

DOTTORATO DI RICERCA
in
SCIENZE COMPUTAZIONALI E INFORMATICHE
Ciclo XXIII

Consorzio tra Università di Catania, Università di Napoli Federico II,
Seconda Università di Napoli, Università di Palermo, Università di Salerno

SEDE AMMINISTRATIVA: UNIVERSITÀ DI NAPOLI FEDERICO II

LEONE MONTAGNINI

La Cibernetica alle origini delle Scienze dell'Informazione. Storia e problemi attuali.

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA

IL COORDINATORE
Professor Ernesto Burattini

Pour prévoir l'avenir des mathématiques la vraie méthode est d'étudier leur histoire et l'état présent. [Poincaré 1908, p. 930]¹

In the present dilemma, it is very well worth while to call history to our aid and to compare the state of mind of the present period with that of other periods of doubt and confusion. This historical attitude, it is true, is suspect to many "tough-minded" contemporaries. What does the stupid repetition of the blunders of the past, they will say, have to do with so live and growing a subject as science? [Wiener 1932, p. 76]

¹ La citazione, in traduzione italiana, è sul sito web di Giorgio Israel.

SOMMARIO

INTRODUZIONE..... 6

L'oggetto di studio.....	6
La struttura della ricerca	7
Cibernetica e Scienze dell'Informazione	8
La fisionomia globale delle Scienze dell'Informazione.....	8
Scienza fluida e scienza solida.....	9
La Cibernetica come Case Study	10
La Cibernetica come Grand Challenge	10

PARTE I: Cibernetica e Controlli Automatici 12

<i>Capitolo 1 - La Teoria dei controlli automatici</i>	<i>15</i>
Le origini dei controlli automatici	15
Definizione di feedback negativo e positivo.....	15
I dispositivi per il controllo automatico	17
Il ruolo degli elementi attivi nei sistemi di controllo	19
I servomeccanismi all'MIT.....	20
Il feedback nella radiotecnica e nelle telecomunicazioni via cavo	21
Il metodo di Nyquist e Küpfmüller.....	23
La teoria dei Sistemi dinamici	24
<i>Capitolo 2 - Le Ricerche sui predittori antiaerei</i>	<i>26</i>
Il problema della difesa antiaerea e la Home Chain inglese	26
La creazione dell'NDRC	27
Le pratiche dell'NDRC.....	28
Gli obiettivi strategici dell'NDRC	29
Chi era Norbert Wiener?.....	30
La proposta di Wiener	32
La nuova ottica introdotta da Wiener	33
Dall'approccio curvilineo all'approccio statistico	36
Lo studio degli esseri umani: il pilota e l'artigliere	37
Entra in gioco il feedback	38
L'esperimento per simulare le difficolt� degli operatori umani.....	39
Il colloquio con Rosenblueth	39
Il Convegno ai Bell Laboratories del 4 giugno 1941	40
Il Convegno del maggio 1941 a Fort Monroe.....	43
Verso una conclusione anticipata	45
L'epilogo della ricerca.....	46
<i>Capitolo 3 – Il primo configurarsi della Cibernetica</i>	<i>49</i>
La Cibernetica come Ingegneria delle comunicazioni generalizzata	49
L'Ingegneria delle comunicazioni generalizzata nello Yellow peril	51
Il nesso con la Teoria dell'Informazione	53
Le concezioni filosofiche di Norbert Wiener.....	55
Il nesso con lo studio dei sistemi biologici	57
Behavior, Purpose and Teleology	59
<i>Capitolo 4 – Epilogo della ricerca sui predittori e note di sociologia della scoperta.....</i>	<i>64</i>
La scienza pura non � brevettabile!	64
Strategie industriali e destini individuali	67
Wiener-Bigelow e gli amplificatori operazionali.....	68
Le linee di faglia della Cibernetica	69
Il pioniere e lo sviluppatore	71
Cibernetica e contesto socio-tecnico.....	72
Il passaggio dall'NDRC all'OSRD.....	74
Le conseguenze della riorganizzazione sulle ricerche di Wiener	75
APPENDICE I:1 - Generalit� sui predittori e sul predittore della Sperry.....	78
APPENDICE I:2 - Il primo progetto di Wiener sui predittori	79

PARTE II : Cibernetica e Computer 81

<i>Capitolo 5. I calcolatori fino all'ENIAC</i>	83
Le calcolatrici aritmetiche meccaniche.....	83
Il calcolo scientifico.....	85
L'evoluzione delle tecnologie delle telecomunicazioni.....	86
La teoria dei circuiti a relè e i calcolatori di Stibitz e di Zuse.....	88
I progetti digitali elettronici di Vannevar Bush.....	91
Claude Shannon.....	93
I progetti per calcolatori aritmetici elettronici.....	96
L'avvio del progetto dell'ENIAC.....	102
<i>Capitolo 6 - Calcolatori e bombe atomiche</i>	107
Un punto di svolta.....	107
“La macchina di Wiener”.....	108
Parallelismo e serialità in Behavior, Purpose and teleology.....	114
Origini e conseguenze del Memorandum sulle EDP.....	115
Von Neumann e il rapporto con Norbert Wiener.....	119
Il Progetto Manhattan e Los Alamos.....	123
Le ricerche di von Neumann per il Los Alamos Laboratory.....	124
Von Neumann alla Moore School.....	130
La questione del coinvolgimento di Wiener nei lavori di Los Alamos.....	133
<i>Capitolo 7 – Neurofisiologia e Computer</i>	138
La teoria neuronale.....	138
Il cervello elettronico di Rudolf Ortway.....	138
Warren McCulloch.....	141
Walter Pitts e la scuola di Rashevsky.....	142
“A logical calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity”.....	144
Reti neuronali e feedback.....	145
La collaborazione tra Pitts e Wiener.....	146
Cibernetica e biomatematica.....	147
I primi passi del rapporto tra Wiener e Pitts.....	149
<i>Capitolo 8 – Dal Convegno di Princeton a Hiroshima</i>	150
L'iniziativa del Convegno di Princeton.....	150
Il Convegno di Princeton e i compiti assegnati da von Neumann.....	152
Il gruppo “3”: calcolo numerico e progetto di calcolatori.....	154
Il gruppo “2”: calcolo applicato alla statistica (e alla crittologia?).....	156
Il gruppo “1”: Wiener e Pitts.....	156
Il gruppo “4”: Aspetti di neurologia collegati.....	159
La ricerca di un linguaggio comune.....	159
L'interesse di Wiener e Pitts per il calcolo digitale e il cervello.....	160
Il punto di vista di von Neumann.....	162
Intanto a Los Alamos.....	165
Intanto alla Moore School.....	166
Wiener e von Neumann nel 1945.....	167
The mathematical formulation of the problem of conduction.....	169
All'apice dell'entusiasmo, alle soglie di Hiroshima.....	171
<i>Appendice II.1: La linea di Ritardo</i>	173

Parte 3. La Cibernetica nel Dopoguerra 174

<i>Capitolo 9 – La “scienza senza nome” si dà delle strutture</i>	175
La crisi di coscienza di Wiener.....	175
La Conference on Advanced Computation Techniques. MIT 1945.....	177
L'atteggiamento etico di von Neumann e Wiener di fronte alla guerra.....	178
I cambiamenti di programma di von Neumann.....	179
Il progetto di ricerca di Rosenbluth, Wiener e Pitts.....	183
L'MIT Rockefeller Electronic Digital Computer.....	184
Le Macy Conferences on Cybernetics.....	186

<i>Capitolo 10 – Le riflessioni teoriche della Prima Cibernetica</i>	191
Computer e cervelli come macchine universali di Turing	191
Il discorso di Wiener e Rosenblueth sul feedback	193
L’emergere di una prima “informatica teorica”	194
Von Neumann e la biologia molecolare.....	196
A Scientist Rebels.....	198
La nozione di informazione	199
 <i>Capitolo 11 – Uno sguardo alla prima Cibernetica inglese</i>	202
La Missione Tizard.....	202
Il Servo Panel.....	203
Percy J. Daniell.....	204
Arnold Tustin.....	205
Craik e lo studio del fattore umano.....	206
Il computer inglese	209
Computer e neurologia in Inghilterra.....	213
 <i>Capitolo 12 – Cervello, computer, informazione</i>	214
Wiener, l’Inghilterra ed il libro Cybernetics.....	214
La svolta di Cybernetics	215
Il cervello e il computer per Wiener	217
Il cervello e il computer per Turing	219
Il cervello e il computer per von Neumann	222
L’Informazione come grandezza nuova.....	223
La riduzione della Cibernetica nell’alveo della razionalità strumentale	225
L’epilogo della Cibernetica	226
 CONCLUSIONI	228
Cos’è la Cibernetica?	228
Lo studio comparativo di animali e macchine	230
Il ruolo della genialità individuale nella ricerca di base	232
 BIBLIOGRAFIA	237

INTRODUZIONE

L'oggetto di studio

La presente ricerca è un'indagine storiografica problematicamente orientata dalle esigenze attuali delle Scienze dell'informazione, con speciale attenzione a quelle informatiche. Essa ha per oggetto la Cibernetica, in particolare la fase iniziale di questo movimento scientifico (si lascia per ora aperto il problema della sua specifica natura epistemica di scienza, ingegneria teoria, programma di ricerca o altro). Una fase che viene solitamente definita in inglese "Early Cybernetics"² e in italiano "Prima Cibernetica". Per dare dei limiti di riferimento più precisi, possiamo indicarla come quel movimento dominato da figure come Norbert Wiener, John von Neumann, Warren McCulloch, Walter Pitts ed altri, negli Stati Uniti, e da Kenneth Craik, Alan Turing ed altri, nel Regno Unito, per come si viene profilando nel periodo compreso tra il 1940 e il 1953. Queste date hanno ovviamente una certa dose di arbitrarietà ma sono significative. Il *terminus a quo* corrisponde all'anno in cui Norbert Wiener vide accettato dall'NDRC (lo US National Defence Research Committee) ed avviò il suo progetto di ricerca sui predittori antiaerei, nonché redigette ed inviò all'NDRC, vedendoselo rifiutare, un *Memorandum on the mechanical solution of partial differential equations*, che conteneva il progetto per un calcolatore elettronico digitale molto veloce, sebbene senza un programma interno vero e proprio. Il *terminus ad quem*, il 1953, corrisponde all'anno in cui si svolse l'ultimo dei dieci convegni conosciuti come *Macy Conferences on Cybernetics*, che costituirono il teatro principale delle riflessioni della prima generazione dei "cibernetici" nell'immediato dopoguerra. Geograficamente ci si è limitati al mondo scientifico anglo-americano, con una preferenza per gli Stati Uniti, dove la Cibernetica è indubbiamente scaturita.

Si è dato un certo spazio anche alla storia che precede e prepara la Cibernetica, soprattutto al fine di comprendere il costituirsi dei concetti (controlli automatici, calcolo digitale, informazione ecc.) e per individuare le continuità e i punti di rottura del movimento cibernetico con il passato, ciò anche tenendo presente la necessità di rispondere ai dubbi sollevati da alcuni autori che hanno negato che esso abbia effettivamente costituito una novità rispetto al passato. Per esempio, nel 1969, il neurofisiologo olandese A. A. Verveen (1971, p. 24) asseriva che la Cibernetica di Wiener suscitava tra i fisiologi e non solo una sensazione di *déjà vu*. Sfuggiva a Verveen che, anche nel trattare il fenomeno del *feedback*, il fulcro delle preoccupazioni della Cibernetica è costituito non dall'energia ma dall'informazione, come è stato ben colto, per esempio, da Settimo Termini (2006, p. 461) e da Aldo de Luca (2006, p. 245). Quest'ultimo ha scritto: «The great novelty of Cybernetics was the introduction, in the setting of the physical sciences, of a new entity called *information*». [de Luca 2006, p. 245] Il concetto di

² Cfr. ad esempio tale uso in Ramage e Shipp (2009), antologia di pensatori "sistemici" suddivisa nelle seguenti parti: Early Cybernetics; General Systems Theory; System Dynamics; Soft and Critical Systems; Later Cybernetics; Complexity Theory; Learning Systems. Include nella "Early Cybernetics" brani di Bateson, Wiener, McCulloch, Margaret Mead e Ashby; mentre nella "Later Cybernetics" von Foerster, Stafford Beer, Maturana, Luhmann e Watzlawick.

informazione d'altro canto comportava allora, come purtroppo accade ancora oggi, notevoli difficoltà di ordine teorico.³

Si è anche cercato di situare la Cibernetica nel suo contesto socio-storico, tentando anche qui di cogliere quali sono le caratteristiche differenziali rispetto ad altri approcci scientifici affini ad essa contemporanei, nonché le dinamiche sociologiche che hanno favorito l'avvento di tale movimento. Ha dato parecchio filo da torcere, specialmente nel secondo capitolo, una tendenza recente a negare l'originalità della Cibernetica sul piano sincronico, con l'enfatizzazione del ruolo degli ingegneri e delle compagnie industriali a discapito dell'attività di scienziati creativi geniali come Wiener, von Neumann o Turing. È questa una tesi sostenuta soprattutto da David Mindell (2002, spec. p. 6),⁴ studioso serio dei cui lavori molto documentati ci siamo qui peraltro significativamente avvalsi. Si tratta, tra l'altro, di un atteggiamento storiografico che già Wiener aveva visto affiorare nel suo tempo ed aveva discusso nel volume postumo, quasi ultimato nel 1954, su *Invention. The Care and Feeding of Ideas*, in cui si sostiene la tesi condivisibile che le scoperte e le invenzioni nascono da un giusto equilibrio tra contesto socio-culturale e creatività individuale, come pure da uno stretto intreccio cooperativo tra scienziato e ingegnere [cfr. Wiener 1993, it. p. 29]. Wiener non rinunciava a sottolineare l'ineminabilità del ruolo del genio nella storia dell'invenzione e della scoperta, sostenendo che c'è una fase iniziale in cui «la mancanza di una mente geniale che in quel momento svolga il ruolo opportuno [...] può rimandare le cose di cinquant'anni o di un secolo» [ivi, p. 32].

In proposito non si può negare che la Cibernetica appaia come una insolita riunione di menti eccelse, in genere con alle spalle una storia di bambini prodigio, tanto che Vittorio Somenzi - uno dei protagonisti della Cibernetica italiana - ha imputato il declino della Cibernetica proprio alla scomparsa di «studiosi eccezionali come A. M. Turing, J. von Neumann e N. Wiener», in «grado di abbracciare dall'alto di un completo dominio della matematica e della logica contemporanea la ricchissima fenomenologia offerta da scienze apparentemente prive di terreno comune» [Somenzi 1978, p. 430].⁵

La struttura della ricerca

La ricerca segue un andamento sostanzialmente cronologico. Nelle prime due parti si analizzano i due principali aspetti intorno ai quali, durante la Seconda guerra mondiale, si viene costituendo il programma della Cibernetica: 1) il suo rapporto con la teoria dei controlli automatici e con il suo corrispettivo neurofisiologico, secondo una impostazione che risulta in parte già nel rapporto tecnico di Wiener del 1942 conosciuto come *Yellow Peril*, e nell'articolo del 1943 su "Behavior, Purpose and Teleology", che egli redigette insieme all'ingegnere Julian Bigelow ed al fisiologo Arturo Rosenblueth, sul ruolo del *feedback* negativo nel comportamento intenzionale; e 2) le teorie e tecniche di progettazione del computer, inteso nel senso moderno, unitamente al suo corrispettivo neurofisiologico, il cervello, implicato soprattutto nelle ricerche sulle reti neuronali di McCulloch e Pitts.

Mentre la prima parte, che riguarda soprattutto i primi due anni della guerra, ha un valore metodologicamente strutturante delle modalità di ricerca e dei contorni della Cibernetica, nel corso della seconda parte si osserva il costituirsi del nucleo di interessi prevalenti del

³ Cfr. in proposito ancora Settimo Termini (2006, p. 464) e Aldo de Luca (2006, p. 245).

⁴ Questa tesi era già accennata da Mindell nella sua tesi di *Ph.D.* [Mindell 1996], ed ha trovato il consenso di una studiosa della Cibernetica altrettanto seria - purtroppo prematuramente scomparsa - come Lily Kay (cfr. 2000, nota 20 p. 348).

⁵ La considerazione di Somenzi è stata richiamata da Aldo de Luca (2006, p. 244).

programma cibernetico, nel quale il computer svolge un ruolo cruciale, che tutti i protagonisti della prima Cibernetica, Wiener incluso, in gran parte condividono.

Nella terza parte, si analizzano i primi passi della Cibernetica nel dopoguerra, seguendo il dibattito soprattutto negli Stati Uniti, con una breve scorribanda nella Cibernetica inglese, ed analizzando alcuni testi di Wiener, von Neumann e Turing, in cui si presentano tre accezioni della Cibernetica simili ma non identiche.

È stato ridotto lo spazio dedicato alla presenza delle scienze sociali nella cornice delle Macy Conferences, a cui chi scrive ha, tra l'altro, dedicato in passato più di un lavoro.⁶ Non è stato possibile se non per sommi capi esaminare ciò che accade dopo la prima fase della Cibernetica, a causa della mole che la ricerca è andata assumendo, corrispondente alla vastità davvero imponente del materiale oggi resosi disponibile, in conseguenza principalmente della rivoluzione nella documentazione provocata da Internet e per l'indubbio lievitare dopo il 2000 dell'interesse verso gli argomenti storiografici trattati, in precedenza restati piuttosto al margine.

Nel corso della ricerca sono emerse riflessioni, per alcuni versi inaspettate sia in ordine allo sviluppo delle vicende, ma anche con riguardo a nessi concettuali (per esempio su informazione e energia; sul nesso tra computer e cervello), che a mio parere possono costituire intuizioni non banali per ulteriori sviluppi teorici.

Cibernetica e Scienze dell'Informazione

Sembra piuttosto validamente stabilito dalla ricerca il punto che ne costituisce il cuore e la motivazione prima, ovvero il fatto che la Cibernetica, specialmente nella sua prima fase, ha costituito uno snodo cruciale per quell'insieme di discipline scientifico-ingegneristiche a cui nell'università italiana odierna si dà oggi il nome di Scienze dell'Informazione, locuzione con cui si cerca di indicare un insieme di discipline costituito dall'Informatica, in tutte le sue articolazioni subdisciplinari, compresa l'Informatica Teorica (che raccoglie e sistematizza Teoria degli Automi, Teoria della Computabilità, Teoria dei linguaggi formali, Teoria della complessità computazionale ecc.); l'Intelligenza Artificiale; le diverse sottodiscipline afferenti alle telecomunicazioni, inclusa la Teoria dei segnali e la Teoria matematica dell'informazione; la Robotica; la Bionica e le Teorie dei controlli automatici analogici e digitali. Discipline che tra gli anni Quaranta e l'inizio degli anni Cinquanta, naturalmente, non avevano ancora assunto l'assetto teorico e metodologico con cui le conosciamo oggi, ma che tuttavia in gran parte passarono per lo stretto collo di bottiglia della "Prima Cibernetica". Tra le altre cose, sebbene molte storie dell'informatica ignorino oggi il ruolo svolto dalla Cibernetica, la storia della creazione del computer moderno si intreccia in maniera indirimibile con quella della Cibernetica, la quale costituì il primo ambito di teorizzazione ad elevata generalità entro il quale il computer moderno è stato sviluppato e sottoposto a rigorose analisi teoriche.

Occorre aggiungere che la Cibernetica delle origini includeva anche il territorio di fatti oggi studiato dalle Neuroscienze e, per molti versi, dalla Biologia molecolare, ed anzi si può dire che proprio questo nesso costituì uno dei cardini identitari del programma cibernetico.

La fisionomia globale delle Scienze dell'Informazione

Non è stata la mera curiosità storiografica su vicende del passato pur riguardanti le Scienze dell'Informazione a muovere e guidare la presente ricerca. Un motivo generale, che vale in molti campi del sapere, è dato dal fatto che il passato di una scienza non è semplicemente il luogo di problemi sorpassati e ormai archiviati. Viviamo in un tempo in cui occorre essere

⁶ Cfr. in particolare Montagnini (2000-2001; 2007 e 2008).

costantemente aggiornati sul lavoro degli altri nel nostro campo e mai come oggi nel lavoro scientifico è stato vigente il principio dell'aggiornamento rapido. Eppure occorre considerare che gli scienziati che ci hanno preceduto possono ancora, almeno per alcuni versi, godere di una prospettiva migliore sull'oggi di quella posseduta dagli scienziati contemporanei.

Per spiegare quale effetto prospettico può provocare il ritorno al passato, si può pensare a quelle immagini studiate dagli scienziati cognitivi, in cui si intravede la fisionomia di una persona solo quando ci si allontana dall'immagine che lo ritrae. Paradossalmente, sebbene l'allontanamento dalla foto ci faccia perdere delle informazioni, al contempo evidentemente esso fa sì che diminuiscano maggiormente quelle irrilevanti rispetto a quelle rilevanti al fine del riconoscimento del personaggio. Lo stesso può accadere andando a ritroso nel tempo. Certamente la storia è creativa e non ci sognamo nemmeno per un istante di indulgere in un irresponsabile determinismo storico, tuttavia può accadere che tornando indietro nel passato si riconquisti una prospettiva d'insieme perduta, che *cum grano salis* può aiutare a comprendere il nostro oggi. Questo sembra piuttosto plausibile nel caso specifico delle Scienze dell'Informazione, scienze che hanno registrato - a causa del loro indiscutibile successo - un'esplosione gigantistica di quegli embrioni disciplinari che erano inquadrati insieme già con qualche difficoltà una cinquantina di anni fa nell'ambito della Cibernetica.

Scienza fluida e scienza solida

Sembra interessante in proposito proporre anche un altro argomento che ci viene suggerito dallo stesso Wiener, il quale in un articolo del 1932, alla luce delle difficoltà in cui versava la fisica newtoniana di fronte all'avvento della relatività e della fisica dei quanti, invitava a rivisitare la scienza del tempo di Leibniz, un'epoca cioè in cui la fisica newtoniana era ancora soltanto «un'alternativa teorica in lotta per il proprio riconoscimento» accanto ad alternative come l'approccio ondulatorio di Huyghens o quello pan-psichico di Leibniz, e ciò al fine di rinvenire suggerimenti per l'oggi [cfr. Wiener 1932, p. 76].

Intravediamo qui la possibilità di una rappresentazione della storia di una disciplina scientifica che arricchisce la visione proposta da Thomas Kuhn negli anni Sessanta. Secondo Kuhn (1970), una disciplina scientifica è caratterizzata dal susseguirsi di periodi normali e periodi rivoluzionari; nel periodo normale si procede guidati da un paradigma, che si tende a mantenere inalterato mediante l'introduzione di ipotesi *ad hoc* quando si incontrano risultati che lo contraddicono; arriva un momento, però, sostiene Kuhn, in cui le ipotesi *ad hoc* divengono eccessivamente numerose, la disciplina entra perciò in una fase rivoluzionaria, finché non si perviene ad un riaggiustamento gestaltico che consente l'affermarsi di un nuovo paradigma, su cui si lavorerà nell'ambito di una nuova fase di scienza normale. Seguendo il suggerimento *ante litteram* di Wiener, si può correggere la visione di Kuhn in senso meno linearmente progressivo. Nelle fasi rivoluzionarie della scienza, che forse sarebbe bene chiamare "fasi fluide", in contrapposizione alle successive "fasi consolidate", si assiste in realtà al confronto di una pluralità di proposte alternative, che poi vengono oscurate dalla proposta risultata vincente, che andrà a costituire il nuovo paradigma della fase solida. Secondo Wiener, queste alternative oscurate devono essere di nuovo prese in considerazione nelle fasi di crisi del paradigma di successo. Nella fase solida, va aggiunto, le alternative perdenti in genere nemmeno scompaiono del tutto: non raramente esse possono sopravvivere come teorie di minoranza, nel senso che trovano scarso seguito senza essere state popperianamente confutate. Per esempio, nella fase fluida della fisica e cosmologia antiche, che precedette l'affermazione del geocentrismo aristotelico, scopriamo proposte relativistiche da parte dei fisici ionici e degli

atomisti [cfr. Sambursky 1956].⁷ Esse mantennero lo *status* di teorie di minoranza in epoca tardo antica e riapparvero nel Rinascimento con Niccolò Cusano e Giordano Bruno, per affermandosi in maniera rigorosa soltanto nel Novecento con Albert Einstein.

Venendo ora alla Cibernetica, essa potrebbe essere considerata come la fase fluida delle Scienze dell'Informazione. In seguito essa, invece di trovare una stabilizzazione unitaria, si è andata consolidando in una pluralità di approcci stabili, spesso molto ben sistematizzati, come mostra l'informatica teorica, la quale, con la sua forte strutturazione logica ed una altrettanto solida pervasività manualistica, appare oggi come l'epitome stessa di una scienza normale kuhnianamente intesa. Eppure nel corso della solidificazione, molte promesse della Cibernetica sono rimaste inevase, e continuano a riapparire sotto altre vesti.

La Cibernetica come Case Study

Giustamente Settimo Termini - che ha dedicato alla Cibernetica degli anni Quaranta e Cinquanta una prolungata e profonda riflessione, che si incentra sulla sua natura, origine e declino, e sui problemi concettuali, metodologici ed epistemologici implicati - ritiene che lo studio della Cibernetica può avere innanzitutto il valore di un *case study*. L'analisi dei punti di forza e debolezza, egli sostiene, può rivelarsi utile per altre discipline al centro dell'attenzione oggi, che si sono date "very general goals and (part of) the epistemological attitude" della Cibernetica,⁸ come la Teoria Generale dei Sistemi, l'Intelligenza Artificiale e le Scienze Cognitive, che hanno alcuni obiettivi comuni con la Cibernetica.⁹ Più recentemente una analoga esigenza emerge con il cosiddetto paradigma "Nano-Bio-Info-Cogno" (NBIC) [cfr. per es. Bainbridge e Roco 2005].

La tesi generale di Termini è che la Cibernetica, con la sua ambizione di essere una scienza unificata ed unificante, mancò questo obiettivo raggiungendo tuttavia importanti risultati più ristretti, che poi si sono sviluppati in maniera solida e profonda rifluendo entro scienze tradizionali. Così è accaduto per esempio alla Teoria degli automi, che dopo il fondamentale teorema di Kleene che ha caratterizzato le reti di McCulloch e Pitts attraverso i linguaggi regolari, ha poi trovato un fertile terreno per espandersi nell'Algebra e dell'Informatica teorica.¹⁰ Inoltre, la Cibernetica ha avuto il merito di porre all'ordine del giorno concetti fondamentali come quelli di interdisciplinarietà, informazione e complessità (nel senso di von Neumann), sebbene restino ancora oggi problematici.

La Cibernetica come Grand Challenge

L'analisi di Settimo Termini, in cui tra l'altro viene più volte reiterata l'espressione "challenge" riferita a Wiener e alla Cibernetica, entra sorprendentemente in risonanza con una riflessione proposta da Johann Eder (2010) nella prolusione conclusiva del ventesimo European Meeting on Cybernetics and Systems Research, tenuta all'Università di Vienna nell'aprile 2010, e dedicata alle "Grand Challenges for Computer Science Research."¹¹

Negli ultimi anni alcune prestigiose istituzioni, attive nella promozione dell'innovazione scientifica e tecnologica in diversi campi del sapere, hanno formalizzato l'idea di proporre

⁷ Si tratta di queste teorie cosmologiche in [Montagnini 2009]. Proprio mentre rileggo questa tesi esce il volume del fisico Carlo Rovelli (2011) che rilegge le vicende della scienza occidentale a partire dalla "rivoluzione di Anassimandro".

⁸ Cfr. Termini (2006c, p. 467). Si veda anche Termini (2006b), spec. pp. 167-170.

⁹ Cfr. Termini (2006c, p. 462).

¹⁰ Cfr. Termini (2006c, p. 462). Su questo punto è analogo il parere di Aldo de Luca (2006, p. 244).

¹¹ Johann Eder è ordinario di Information and Communication Systems all'Università di Klagenfurt, Austria, e dal 2005 dirige il Dipartimento per le scienze naturali e la tecnologia dell'Austrian Science Funds (FWF). Cfr. www.uni-klu.ac.at

delle agende di *grand challenges*, di “sfide ambiziose”. Basandosi in parte sui risultati di uno studio dello UK Computing Research Committee (UKCRC) [cfr. Hoare e Milner 2005] Eder ha presentato un’analisi delle caratteristiche essenziali che una *grand challenge* deve possedere per esser tale.

Secondo la rappresentazione di Eder e dell’UKCRC, una *grand challenge* deve essere di lungo periodo e riguardare la scienza fondamentale; deve essere semplice da comunicare e da comprendere, e dotata di una grande carica idealistica, senza essere palesemente irrealizzabile, così da mobilitare giovani ricercatori e da entusiasmare le persone comuni; essa non guarda ad utilizzi commerciali immediati, sebbene conduca nel corso del suo raggiungimento a scoperte e invenzioni intermedie. Una *grand challenge* generalmente richiede la collaborazione interdisciplinare e la cooperazione di scienze pure e applicate, ed ha anzi la capacità di riunire e mettere ordine entro diversi filoni di ricerca, di trattare problemi irrisolti da lungo tempo, che promettono - se risolti - di indurre rivoluzionari cambiamenti di paradigma scientifico [cfr. Eder 2010, pp. XI-XII].

Gran parte di questi caratteri furono certamente posseduti anche se implicitamente dalla Cibernetica, che appare essere stata certamente una *grand challenge* nell’accezione attuale, fatto che ne giustifica il successo dei primi anni. A maggior ragione, di fronte alle attuali *grand challenges* è utile rileggere oggi la Cibernetica per non incorrere negli stessi errori ed ostacoli, interni ed esterni, che ne decretarono l’abbandono.

Eder invita ad una rivisitazione della Cibernetica storica però soprattutto per un motivo specifico, in quanto cioè tra le nove *Grand Challenges in Computing Research* accettate dal Congresso dello UKCRC del 2008 [cfr. Kavanagh e Hall], la Cibernetica classica in senso stretto sembra rinascere dalle ceneri. Ne vengono ripresi quasi letteralmente gli obiettivi primari nella sfida *The Architecture of Brain and Mind*, implicante la collaborazione di Scienze computazionali e Neuroscienze: una sfida rivolta - da un lato - alla comprensione del funzionamento del cervello in quanto computer, onde sviluppare dei computer “brain-inspired”, più intelligenti, affidabili ed energeticamente efficienti, e dall’altro, per studiare la psicologia umana al fine di escogitare, ad esempio, delle terapie per i disturbi mentali. Si tratta di una sfida oggi ad alta priorità su scala mondiale, come dimostra la sua affinità con il programma *SyNAPSE* (Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics) diretto da Todd Hylton per la DARPA (US Defense Advanced Research Projects Agency).¹²

Altre due *grand challenges* dell’UKCRC ripropongono obiettivi che si avvicinano al discorso cibernetico. Esse sono: la sfida *Journeys into Non-classical Computation*, rivolta alla ricerca di architetture post von Neumann e post Macchine di Turing, già cercate a dire il vero dallo stesso Turing; e la sfida *In Vivo - In Silico: Modelling Living Processes*, rivolta alla scoperta di nuovi metodi di simulazione al computer del metabolismo cellulare, che appare in qualche modo come il prolungamento delle ricerche di von Neumann, ma anche di Wiener, sugli automi che si autoriproducono, e di Turing sulla morfogenesi [cfr. Eder 2010, p. XXV].

Giustamente Johann Eder, richiamando queste tre sfide, ha affermato che in esse «might be seen as revisiting some of the foundational research questions of cybernetics and systems theory», ed ha concluso che «it seems to be worthy to dig out those old books and scripts from the library and have a fresh look» [ivi].

¹²[www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Systems_of_Neuromorphic_Adaptive_Plastic_Scalable_Electronics_\(SYNAPSE\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Systems_of_Neuromorphic_Adaptive_Plastic_Scalable_Electronics_(SYNAPSE).aspx).

PARTE I: Cibernetica e Controlli Automatici

Fin dall'uscita di *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine* (1948), il libro di Norbert Wiener che introdusse la prima teorizzazione unitaria della Cibernetica, nonché la stessa denominazione disciplinare, è stata avvertita una difficoltà nel comprendere il ruolo assegnato all'interno della Cibernetica alla Teoria dei controlli automatici ed in particolare a quella nozione chiave in questa teoria che è il *feedback*.

Ad esempio, Michael Arbib (1964), nel libro *Brains, Machines and Mathematics*, riconosceva che «tutto quanto abbiamo trattato sinora può essere incluso nella “Cibernetica”». [it p. 104]. Di fatto, il libro - come leggiamo nell'introduzione all'edizione italiana di Eduardo R. Caianiello - conteneva una esposizione integrata di diversi campi comprendente «la neurofisiologia, la teoria dell'informazione, l'ingegneria, la teoria degli automi e la logica matematica» [ivi, p. 7]. Tuttavia Arbib intitolava “Cibernetica” il capitolo dedicato al *feedback*, spiegando che in esso voleva occuparsi «principalmente dei problemi discussi da Wiener nel suo libro *Cibernetica*» [ivi, p. 104].

Solo per fare un altro esempio, questa volta recente, si può citare la storia della Cibernetica sovietica di Slava Gerovitch (2002), dove leggiamo che la versione della Cibernetica di Liapunov, Sololev e Kitov - protagonisti della Cibernetica sovietica, sorta in era krusheviana terminato dell'ostracismo dato a questi studi da Stalin - «differed from Wiener's eclectic collage in several important respects. First, they chose the computer rather than the servomechanism as an archetipal cybernetic machine.» [p. 178]

Accade ancora oggi che studiosi come Edgar Morin o Fritjof Capra giungano addirittura ad attribuire a Wiener la stessa paternità del concetto di *feedback*:¹³ una vera e propria leggenda, dura a morire, nata molto probabilmente tra gli studiosi di scienze socio-umane dalla lettura dell'articolo “Behavior, Purpose and Teleology”, di Wiener, Bigelow e Rosenblueth, pubblicato sulla rivista *Philosophy of Science* nel 1943, che fu molto probabilmente il primo testo non tecnico e non sottoposto a segreto ove la parola “*feedback*” compariva come concetto teorico dei controlli automatici. All'opposto, autori che si sono occupati a fondo della storia dei controlli automatici e del concetto di *feedback* - come Stuart Bennett (1993), David A. Mindell (1996 e 2002), Chris Bissell (2009), George P. Richardson (1991) - sanno bene che non è così; anzi tendono a minimizzare, se non in alcuni casi ad azzerare, il contributo dato da Wiener in quel contesto.

Nella fase molto fluida della Cibernetica che costituisce l'oggetto del presente lavoro, indicata nell'introduzione come “Prima Cibernetica”, vi furono certamente diversi modi di intendere questo campo nascente, fiorito prima dell'uscita del libro di Wiener senza neppure una denominazione disciplinare. Certamente i controlli automatici ed il *feedback* non ebbero un ruolo di particolare rilievo nel modo in cui questo campo fu inteso da altri protagonisti di spicco, come John von Neumann o Alan Turing. Tale ruolo è però innegabile nel caso dell'interpretazione wieneriana ed in generale si può dire che le ricerche anglo-americane connesse ai controlli automatici condotte durante la Seconda guerra mondiale svolsero un ruolo molto significativo, sebbene complesso e di interpretazione non piana, nello strutturarsi della Cibernetica. Non è un caso che il termine “controllo” costituisca la prima parola del sottotitolo del libro di Wiener e che nello scegliere la parola “Cybernetics”,¹⁴ calco di una parola greca

¹³ Scrive ad esempio Edgar Morin (1991) : «Le nozioni di effetto e di causa erano già diventate complesse con la comparsa dell'anello retroattivo di Norbert Wiener (nel quale l'effetto ritorna in maniera causale sulla causa che lo produce)» [p. 53]. Scrive invece Fritjof Capra (1996): «Tuttavia, le macchine cibernetiche sono molto differenti dai congegni a orologeria di Cartesio. La differenza fondamentale è racchiusa nel concetto di *feedback*, o retroazione, introdotto da Norbert Wiener, ed è espressa nel significato stesso del termine “Cibernetica”» [it, p. 69].

¹⁴ La storia della scelta della parola è raccontata da nell'autobiografia di Wiener (1956) *I am a mathematician*, p. 322.

che vuol dire “arte del governare una nave” e per estensione “arte del governare” *tout court*, Wiener (1948) dica di volere «to recognize that the first significant paper on *feedback* mechanisms is an article on governors, which was published by Clerk Maxwell in 1868» [p. 11].

Tuttavia i controlli automatici ed il *feedback* sono importanti nel libro in una misura molto minore di quanto comunemente si ritenga, e certamente in una maniera subordinata al centro dell’interesse di Wiener, costituito da una sua peculiare interpretazione generalizzata della “communication engineering”, una teoria cioè che egli desiderava si occupasse essenzialmente dell’elaborazione e della trasmissione dell’informazione, includendovi sia i controlli automatici ed il *feedback* (nel contesto analogico ma anche già in quello digitale), sia la scienza dei calcolatori, e che trovava – come hanno giustamente intravisto i teorici della Cibernetica sovietica – proprio nel computer moderno la sua epitome massima.

In tal senso sembra opportuno iniziare la nostra ricerca con alcuni cenni sulla storia dei controlli automatici e del concetto di *feedback* sino alle soglie della Seconda guerra mondiale. Nel secondo capitolo discuteremo le ricerche sui predittori focalizzandoci soprattutto sull’operato di Wiener, mostrando anche in che modo i controlli automatici ed il *feedback* vi rientrino. Nel terzo capitolo evidenzieremo come queste prime ricerche iniziarono a costituire il campo di ricerca della Cibernetica.

Capitolo 1 - La Teoria dei controlli automatici

Le origini dei controlli automatici

I controlli automatici sono stati per secoli il territorio dell'inventore che opera per tentativi felici, piuttosto che dello scienziato teorico. Ancora oggi tale teoria non ha per obiettivo la spiegazione di come i sistemi automatici possano funzionare da soli; piuttosto si tratta di un insieme di tecniche per progettare dispositivi da aggiungere ad una macchina per ottenerne determinate prestazioni.¹⁵ Come scrivono Lepschy (1998), tale teoria serve a progettare dispositivi con i

«quali intervenire, ad esempio, su un motore per farne variare la velocità nel modo voluto (o per mantenerla costante al valore desiderato in circostanze nella quale avrebbe invece manifestato la tendenza a variare)». Essa è dunque «intesa a far andare le cose in un determinato modo, diverso da quello in cui sarebbero andate senza lo specifico intervento dall'esterno dell'azione di controllo» [p. 180].

Al centro di questi sistemi è un fenomeno che consiste nel prelevare dal sistema in oggetto una grandezza fisica che ci interessa controllare e di far sì che sia essa stessa a produrre il cambiamento correttivo che serve. Ad esempio, si controlla la temperatura di un frigorifero mediante un termostato che al di sopra di un certo livello di temperatura accende il compressore che provoca il raffreddamento, e che al di sotto di un certo livello lo spegne. Tale fenomeno è detto in inglese “*feedback*” (nel caso specifico si parla di “*feedback* negativo”), termine che si rende in italiano anche come “retroazione” (nel caso specifico “retroazione negativa”).¹⁶

Definizione di feedback negativo e positivo

Dispositivi a scopo di controllo utilizzando *feedback*, principalmente negativo, furono conosciuti sin dall'epoca ellenistica [cfr. May 1969, pp. 11-52]. Però il fenomeno del *feedback* restò imboscato nelle pratiche degli artigiani e degli ingegneri ed emerse con chiarezza solo con Seconda guerra mondiale, allorquando la teoria dei controlli automatici venne reinquadrata entro la cornice teorica dell'ingegneria delle telecomunicazioni. Le stesse rappresentazioni che si utilizzavano in precedenza per questi sistemi prima dell'ultima guerra mondiale erano costituite o da disegni realistici delle macchine o, in una fase successiva, da modelli matematici, prevalentemente basati su equazioni differenziali, per lo più lineari o linearizzate. Il *feedback* emerge, invece, in maniera piuttosto autoevidente nei due metodi grafici oggi comuni: i diagrammi a blocchi e i grafi di flusso. Essi sono formalmente equivalenti, ma permettono di vedere lo stesso fenomeno da prospettive diverse.

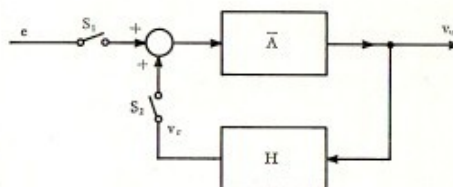


Figura 1

¹⁵ Questo fatto è stato ben colto da Richardson (1991), il quale ritiene – e concordo con lui – che ciò abbia influenzato il modo stesso di intendere i fenomeni a *feedback* da parte del filone che fa riferimento all'impostazione di Wiener.

¹⁶ Dato tuttavia che è piuttosto comune anche il termine inglese qui lo si preferirà.

In un diagramma a blocchi [*“block diagram”*] come quello di *figura 1*, i dispositivi di cui il sistema è composto sono rappresentati in maniera schematica da scatole nere (*black boxes*), dotate di un'ingresso e di un'uscita, e denotate dalla loro funzione di trasferimento, che ne rappresenta esaurientemente il comportamento almeno entro i limiti richiesti dalla progettazione. Il *feedback* consiste nel prelevare la grandezza di uscita, reintroducendola - eventualmente modificata - in ingresso, con il farla passare per un comparatore. Se nel comparatore essa va a sommarsi alla grandezza d'ingresso, si parla di *feedback* positivo (come in *figura 1*), se va a sottrarsi, si ha un *feedback* negativo.

Il fenomeno del *feedback* può essere ugualmente rappresentato mediante un grafo di flusso come quello di *figura 2*, tratto da un volume di Fritjof Capra (1996, it p. 75).

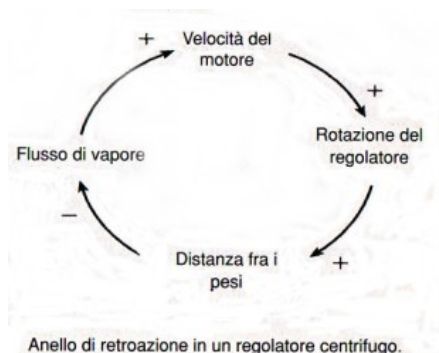


Figura 2

In esso i nodi rappresentano le grandezze in gioco e le frecce, dotate di segno + o -, indicano una relazione causale diretta o inversa. I diagrammi a blocchi erano già usati nell'ingegneria delle telecomunicazioni, per esempio, nelle rappresentazioni delle linee di trasmissione telefoniche o telegrafiche e, già prima della Seconda guerra mondiale, con essi si rappresentava anche il fenomeno del *feedback*, che si verifica nei circuiti negli amplificatori a *feedback* (detti in italiano “amplificatori reazionati”). Non si coglieva però ancora nessuna implicazione del *feedback* ai fini dei controlli automatici.¹⁷

I grafi di flusso si fanno risalire generalmente all'americano Samuel J. Mason, che li introdusse all'inizio degli anni Cinquanta chiamandoli “*Signal flow graphs*”.¹⁸ Come ha mostrato Bennett e come riconobbe lo stesso Mason, essi però erano stati già usati durante la guerra dall'ingegnere inglese Arnold Tustin [cfr. Tustin 1952, pp. 45-6], il quale ha anche polemizzato con la scelta terminologica di Mason, affermando che «they are not signals and they are not flows, they are cause and effect diagrams» [cfr. Tustin 1952, pp. 45-6]. Nel caso del diagramma a blocchi, per la sua origine comunicazionistica - e per ragioni matematiche e fisiche non banali che vedremo più avanti - è piuttosto immediato vedervi scorrere dei segnali. Una accentuazione estrema dell'interpretazione comunicazionista, che è dovuta indubbiamente a Wiener, porta a considerare il *feedback* semplicemente come un “messaggio di ritorno”, piuttosto che come un anello - o “*loop*” - causale, fatto che viene invece messo meglio in risalto nei grafi di flussi. Non a caso quest'ultima rappresentazione è cara a coloro che sono maggiormente interessati ad una visione olistica delle cose, oppure a rappresentare fenomeni che sono più difficilmente interpretabili come informazionistici, ad esempio, in ecologia o nei fenomeni sociali. Una evoluzione dei grafi di flusso è infatti costituita dai grafi utilizzati nella Dinamica dei Sistemi (in inglese “*System dynamics*”), disciplina introdotta da Jay Forrester

¹⁷ Cfr. ad esempio il “Block diagram of the transmitting carrier television terminal at New York” in [Strieby 1938], fig 12 a p. 452.

¹⁸ Cfr. Mason (1953a; 1953b) e Percival (1953 e 1955).

alla fine degli anni Cinquanta [cfr. Richardson 1991, pp. 296 ss.], da non confondere con i “Sistemi Dinamici” (in inglese “Dynamic Systems”).¹⁹

Comunque si giunse a questa visione chiara delle cose solo con l'avvento della cosiddetta “Teoria classica dei controlli automatici”, che venne a costituirsi durante la Seconda guerra mondiale, e principalmente con le ricerche sul controllo del tiro, soprattutto, antiaereo.

I dispositivi per il controllo automatico

Come si diceva, sistemi per il controllo automatico – soprattutto di tipo idraulico o meccanico – furono conosciuti sin dall'età ellenistica. Il loro sviluppo si è intensificato in età moderna ed ha accompagnato la rivoluzione industriale [cfr. Mayr 1969, pp. 127-9]. È molto interessante notare che il *feedback* negativo era usato per rendere regolare i movimenti di meccanismi ad orologeria, già nel tardo medioevo [cfr. Calimani e Lepschy 1990]. Tale constatazione ci costringe a rimettere in discussione un'idea presentata da Wiener in *Cybernetics*, secondo cui gli automi precedenti la rivoluzione industriale fossero dei ciechi orologi, privi di contatto con l'ambiente, modelli di un universo newtoniano che segue leggi immutabili. È vero che tale rappresentazione delle cose apparteneva al fisico che studiava i movimenti newtoniani dei corpi celesti, o del filosofo razionalista, ma era già fondamentalmente inadeguata per quanto riguarda l'artigiano orologiaio e l'ingegnere, alle prese con gli irregolari fenomeni terrestri. Non è detto tuttavia che questi ultimi avessero coscienza di queste relazioni concettuali e non la pensassero invece come chi studiava il moto degli astri; in questo senso, il discorso di Wiener in *Cybernetics* può continuare ad esser valido.

Sistemi di controllo automatico vennero usati nei cosiddetti motori primi: ad orologeria, ad energia idraulica ed eolica, e poi ad energia termica. Era basato sul controllo mediante *feedback* negativo il termostato dell'olandese Cornelius Drebbel (1572-1633), utilizzato per mantenere costante la temperatura nelle incubatrici, progetto che si trova descritto in un manoscritto del 1666. Altri dispositivi citati in letteratura sono la valvola di sicurezza della pentola a pressione, creata nel 1681 da Denis Papin e quello per la regolazione del ritmo degli orologi a pendolo introdotto nel 1673 da Christian Huygens. [cfr. Rubin 1968]²⁰

Si fece un uso molto ampio di sistemi di controllo in relazione alle macchine a vapore: la valvola a cassetto [*slide valve*] che regolava l'immissione del vapore dalla caldaia al cilindro, e dunque la frequenza del ciclo; la valvola di sicurezza del bollitore; un galleggiante per regolare il livello di acqua nel bollitore; un regolatore della pressione del bollitore; un volano ecc. [cfr. *ivi*, p. 11 e Bennett 1979, p. 9]. Un dispositivo che ebbe grande successo tra i progettisti successivi, e che colpì molto l'immaginazione dei contemporanei, fu il regolatore centrifugo di velocità [*Centrifugal speed regulator* o *fly-ball* o *Governor*], introdotto nella macchina a vapore di Watt nel novembre 1788. Watt lo creò mettendo insieme la sua valvola regolatrice a farfalla [*throttle valve*] con un sistema costituito da due sfere rotanti escogitato da John Rennie per mantenere costante la distanza tra le ruote dei mulini (erede di pendoli rotanti già in uso da tempo), di cui Matthew Boulton aveva dato comunicazione a Watt [cfr. Bennett 1979, p. 12-13].

Il funzionamento del “fly-ball” era il seguente: quando un evento come una diminuzione del carico (ad esempio, quando si staccavano alcuni telai azionati dalla macchina a vapore), faceva variare la velocità angolare dell'albero di distribuzione della macchina, in questo caso facendola aumentare, allora aumentava anche la velocità di rotazione delle due sfere rotanti,

¹⁹ Molto utile per far chiarezza nella distinzione tra le due discipline è l'articolo di Osipenko e Farr (2004).

²⁰ La valvola di Papin fu utilizzata in una delle prime macchine a vapore di James Watt, risalente al 1761 o al 1762.

che si alzavano aprendo la valvola a farfalla e facendo uscire del vapore, dunque facendo diminuire la velocità dell'albero di distribuzione. Scrive Watt:

«the Governor [...] shut it [the throttle valve] more or less according to the speed of the engine, so that as the velocity augments, the valve is shut, until the speed of the engine and the opening of the valve come to a maximum and balance each other» [Cito da Bennett 1979, p. 51].

Il principio del *feedback* negativo che sta alla base del ragionamento è chiaro anche se non si sentì ancora il bisogno di introdurre un nome per il concetto [cfr. Bissell 2009]. Divennero presto chiari invece i difetti e i limiti del “Governor” nelle diverse applicazioni. Esso tendeva a sovraccorreggere in una direzione e poi a sottocorreggere nella direzione opposta, oscillando [*hunting*] intorno al valore desiderato [*set point*]. In questo senso Maxwell propose di parlarne come di un “moderatore”, piuttosto che di un “regolatore” vero e proprio. Inoltre la risposta alle variazioni di carico era lenta ed il *range* delle velocità entro cui funzionava molto limitato.

Questi difetti vennero affrontati nei numerosissimi brevetti di regolatori centrifughi di velocità che seguirono a quello di Watt. Le prime descrizioni matematiche di essi apparvero quando essi finirono sotto l'angolo visuale dei matematici. Tra i primi ad interessarsi ad una loro descrizione matematica furono Jean-Victor Poncelet (1788–1867) e l'astronomo Sir George Biddell Airy (1801–1892). Airy aveva bisogno di un *governor* per ottenere un telescopio in grado di ruotare lentamente a velocità uniforme intorno all'asse polare onde compensare la rotazione della Terra, problema a cui già Robert Hooke (1635-1703) si era interessato tra i primi. Nel 1851 Airy pubblicò un supplemento ad un saggio del 1840 in cui descrisse il regolatore cronometrico di Sir William Siemens (1823-1883), utilizzato nel Great Equatorial telescope di Greenwich. Le equazioni differenziali ottenute suggerivano che per togliere le oscillazioni indesiderate era opportuno introdurre dell'attrito, ad esempio, scriveva Airy, quello di un piatto nell'acqua o in un altro liquido perfetto. [Cfr. Bennett 1979, p. 62.] Si trattava della fondamentale scoperta che per aumentare la stabilità del sistema era necessario aggiungere al regolatore un dispositivo di smorzamento [*damping*]. Una nozione importante per lo storico della Cibernetica anche perché ad esso fa riferimento l'articolo “Behavior, Purpose and Teleology” [Rosenblueth *et al.* 1943].

La prima teoria matematica generale per lo studio del problema della stabilità dei regolatori si deve a James Clerk Maxwell, che si era occupato nel 1856 del problema della stabilità degli anelli di Saturno. Aveva scritto:

«There is a very general and very important problem in Dynamics, the solution of which would contain all the results of this Essay and a great deal more. It is this to determine whether a slight disturbance of the motion indicated by the solution would cause a small periodic variation, or a total derangement of the motion.» [Maxwell 1859, pp. 295-6].²¹

In altri termini, si trattava di stabilire sotto quali condizioni un disturbo riesce ad essere riassorbito dal sistema, e sotto quali produce invece conseguenze catastrofiche. Nel 1861 Maxwell fu chiamato a far parte di un comitato per gli standard elettrici della British Association for the Advancement of Science, insieme a William Thomson e William Siemens. In questa occasione era venuto a conoscenza dei *Governors*, ed in particolare di quello costruito per determinare l'unità di misura “Ohm”, esperimento che richiedeva una bobina rotante a velocità costante, al cui scopo era stato progettato da H. C. Fleeming Jenkin (1833-1885) un “friction governor”, provvisto di uno smorzatore idraulico, cioè di un cilindro riempito d'acqua in cui scorreva un peso [cfr. Bennett 1979, pp. 64-5].

Maxwell si rese conto che i problemi connessi ai *governors* erano affini a quelli relativi posti dagli anelli di Saturno. Nel 1867 Maxwell pubblicò il famoso articolo *On Governors* in

²¹ Cfr. anche [Bennett 1979] p. 66 e [Mayr 1971], p.

cui presentò la teoria matematica per una ampia classe di regolatori centrifughi di velocità, tra cui quello di Fleeming Jenkin e quello di Siemens, annotando, in particolare, che un regolatore di velocità può essere caratterizzato da quattro tipi di comportamento:

- «(1) The disturbance may continually increase.
- (2) It may continually diminish.
- (3) It may be an oscillation of continually increasing amplitude.
- (4) It may be an oscillation of continually decreasing amplitude» [Maxwell 1868].

I comportamenti del secondo e quarto tipo gli apparivano coerenti con la stabilità del moto, mentre non lo erano quelli del primo e terzo. Egli dava poi le equazioni della dinamica di questi dispositivi mostrando che la stabilità sia

«mathematically equivalent to the condition that all the possible roots [cioè le reali], and all the possible parts of the impossible roots [cioè le parti reali delle radici complesse], of a certain equation shall be negative.» [Maxwell 1868]

Di lì a poco, nel 1877, il matematico di origine canadese Edward John Routh (1831-1907), laureatosi sotto Maxwell, introdusse un metodo per determinare quando la condizione di stabilità di Maxwell era esaudita da un sistema di equazioni differenziali lineari senza dover passare per la loro soluzione analitica, ma basandosi solo sul segno dei coefficienti dell'equazione caratteristica [Cfr. Routh 1877]. Nel 1911 Enrico Bompiani dimostrò che un altro metodo elaborato indipendentemente da Hurwitz era identico a quello di Routh, perciò si cominciò a parlarne come di metodo o criterio di Routh-Hurwitz.²²

Come mostra *Die Regelung der Kraftmaschinen* [Regolazione delle macchine], un manuale classico di Max Tolle (1905), pubblicato più volte fino al 1921, ormai all'inizio del Novecento il metodo classico di analisi della stabilità era dato dalla linearizzazione delle equazioni che descrivono i sistemi, con successiva verifica se le radici dell'equazione caratteristica siano reali negative o radici complesse a parte reale negativa mediante il metodo di Routh-Hurwitz.

Questo approccio tuttavia non dava utili indicazioni progettuali per la stabilità, né consentiva di valutarne il grado. Per avere un miglioramento in questo senso si dovrà aspettare l'adozione durante la Seconda guerra mondiale dei metodi dell'ingegneria delle telecomunicazioni.

Il ruolo degli elementi attivi nei sistemi di controllo

Emerge dalla storia dei controlli automatici un aspetto che risulta molto importante per la storia della Cibernetica ma che può essere rilevante anche nell'oggi. Nei più diffusi dispositivi di controllo, come nota Stuart Bennett (1993), «the measuring and actuating elements were combined in one physical element» [p. 2].

Nel *fly-ball* di Watt, per esempio, l'unica fonte di energia era quella prelevata dall'albero motore, che serviva ad azionare tutte le parti del regolatore, nonché ad aprire e chiudere la *slide valve*. Si capì presto che, per esempio, nel caso in cui le valvole da azionare da parte di un regolatore di velocità erano molto pesanti, l'azione di controllo era migliorata se per alimentare il sistema attuatore si utilizzava una fonte di energia diversa da quella prelevata ai fini del controllo.

In questa innovazione c'è l'abbozzo della distinzione tra l'energia che viene prelevata per conoscere la grandezza da controllare, e l'energia che serve per muovere l' "attuatore", in altre parole tra energia del "segnale", e quella di "alimentazione". Un dispositivo dotato di una fonte locale di energia, come un transistor o un triodo è detto in elettronica "attivo", mentre uno che

²² Il matematico Adolf Hurwitz (1859-1919) scoprì il metodo su una richiesta di Aurel Boreoslav Stodola, che si stava occupando della stabilità nelle turbine idrauliche. [Cfr. Bissell 2009, p. 5]

utilizza un'unica fonte di energia (tipicamente le resistenze, le induttanze e le capacità) è detto "passivo". A rigore perciò il *fly-ball* di Watt era passivo e solo le versioni successive dotate di una fonte supplementare di energia divennero "attive". Come vedremo nella prima Cibernetica la nozione di dispositivo "attivo" è estremamente importante.

Accanto all'aspetto appena citato si sovrappose alla metà dell'Ottocento un'altra innovazione che in qualche modo potrebbe anche aver gettato ombra sulla prima. Sorse la necessità di realizzare sistemi che amplificassero l'azione di pilotaggio nei timoni delle navi, oppure atti a muovere pesanti cannoni. Vennero detti dal francese Jean Joseph Léon Farcot *servo-moteurs* o *moteurs-asservi*. Notava Farcot che, esercitando sul timone una forza di 3 o 4 kg, il timoniere muoveva un carico da 10.000 a 12.000 kg [cfr. Farcot 1873; Bennett 1979; Remaud 2004]. Essi non erano necessariamente a *feedback*, come mostra il timone senza *feedback*, utilizzante l'energia dei motori a vapore della nave, brevettato negli Stati Uniti nel 1853 da Frederick E. Sickels. Ma già nel 1866 J. McFarlane Gray ne progettò una versione modificata a *feedback*.

Tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento si assistette ad un'ampia diffusione di dispositivi di controllo ad anello chiuso dotati di servomotori, utilizzati per la stabilizzazione delle navi, per mantenere i siluri alla profondità desiderata, o come piloti automatici di navi ed aerei, oppure per generare e trasportare energia elettrica ecc.

Nel servomotore, che è a tutti gli effetti un amplificatore non è necessario il *feedback* negativo, sebbene questo ne migliorasse le prestazioni. D'altro canto, in un sistema di controllo come un regolatore non era a rigore necessario che si disponesse di una fonte di energia ausiliare, sebbene quest'ultimo producesse una migliore azione di controllo. Fu così che apparve il termine "servomeccanismo", come sinonimo di dispositivo di controllo automatico a *feedback* in maniera non completamente appropriata.

I servomeccanismi all'MIT

Un forte interesse per i sistemi di controllo appare all'MIT nella linea di ricerca relativa ai calcolatori analogici, avviata dalla fine degli anni Venti da Vannevar Bush. Nel 1934 un allievo di Bush, l'ingegnere Harold L. Hazen (1901-1980), pubblicò due articoli in cui si discutevano i servomeccanismi. In uno Hazen trattava il cosiddetto "cinema integraph", un dispositivo da egli messo a punto e basato su un metodo suggerito da Wiener. Si trattava di un dispositivo di input in grado di seguire con un fascio ottico una curva da integrare con metodi analogici. Il sistema era definito da Hazen come un "meccanismo ad alte performance", e con orgoglio rimarcava che il segnale di input era rilevato da due cellule fotovoltaiche con una potenza dell'ordine dei 10^{-10} watt, mentre quello di output andava da 10 a 100 watt [cfr. Hazen 1934b, cito da Bennett 1993, p. 106]. In un secondo articolo, più teorico, Hazen definiva un "servomechanism" ritenendo come aspetti essenziali sia l'amplificazione che il "close-cycle", cioè il *feedback*. Scriveva:

«a power-amplifying device in which the amplifier element driving the output is actuated by the difference between the input to the servo and its output». [Hazen 1934a, cito da Bennett 1993, p. 108]

Il rapporto di amplificazione ottenuto da Hazen era di 1 a 10^{12} . Questa situazione trova un parallelo piuttosto impressionante negli organismi viventi. Nello stesso periodo il fisiologo Walter B. Cannon (1939) faceva notare che «i nostri organi di senso sono in grado di rispondere a stimolazioni incredibilmente deboli» e considerava che, ad esempio, l'occhio umano è sensibile a $5 \cdot 10^{-12}$ erg, cioè $5 \cdot 10^{-19}$ joule. D'altro canto, il lavoro delle braccia umane

– possiamo stimare noi in maniera semplice – è dell'ordine di $5 \cdot 10^2$ joule.²³ Nell'essere umano perciò la differenza tra i livelli di lavoro di un sensore come l'occhio e quelli di un attuatore come le braccia è dell'ordine di 1 a 10^{21} .

Questa somiglianza tra servomeccanismi e organismi colpì sicuramente gli studiosi dei servomeccanismi, come dimostra un disegno dell'ingegnere Gordon Brown del 1950 circa, riportato da Wildes e Lindgren (1986, p. 221), in cui viene schematizzato un servomeccanismo come una macchina dotata di un occhio e braccia umane. Ad ogni modo se gli ingegneri dei servomeccanismi sembravano più interessati all'obiettivo in sé di aumentare la distanza tra livelli energetici di lavoro di sensori e attuatori, i teorici della Prima Cibernetica, in particolare Wiener e, in Inghilterra, lo psicologo applicato Kenneth Craik, scorgeranno qui – come vedremo più avanti – uno dei caratteri tipici delle macchine cibernetiche, sia naturali che artificiali, rileggendo tale aspetto mediante le distinte nozioni di “accoppiamento informativo” e di “accoppiamento energetico” [cfr. Wiener 1950 e *infra* capitolo 12].

Il feedback nella radiotecnica e nelle telecomunicazioni via cavo

Come detto, fino alla Seconda guerra mondiale, il concetto di “*feedback*”, sia negativo che positivo, non esisteva in quanto concetto teorico della teoria dei controlli automatici [cfr. Rubin 1968, p. 14]. La parola è attestata invece, senza che si presumesse nessun riferimento ai controlli automatici, nella teoria che presiedeva alla progettazione dei circuiti muniti di tubi a vuoto utilizzati nelle telecomunicazioni, con o senza fili, già dal 1923 come mostra per esempio King (1923).²⁴

È utile introdurre il lettore a qualche rudimento di radiotecnica e sui principi del tubo a vuoto. Per trasmettere le onde radio è necessario un dispositivo oscillatore che generi una corrente elettrica alternata ad alta frequenza, da far passare attraverso un conduttore; al contrario, per essere ascoltato, il segnale radio captato dall'antenna ricevente necessita di essere raddrizzato ed amplificato [Per qualche dettaglio vedi *Appendice I.I*].

L'introduzione dei tubi a vuoto o valvole termoioniche generò una vera e propria rivoluzione, in quanto essi resero possibili circuiti raddrizzatori, amplificatori e oscillatori economici e con elevate prestazioni. È interessante notare qui un fenomeno di sociologia della scoperta piuttosto peculiare. In precedenza abbiamo mostrato che, finché una invenzione come il *governor* non era caduta, quasi per caso, nel campo cognitivo di un fisico matematico come Maxwell, essa era restata solo un *escamotage*; l'incontro dà luogo ad una teoria matematica potente che permette di razionalizzare la progettazione. Nel caso dei tubi a vuoto notiamo un fenomeno di sociologia della scoperta diverso, in quanto il controllo dell'innovazione in un settore è decisamente trainato dalle necessità applicative.

Risalgono in realtà alla metà dell'Ottocento gli studi sull'effetto termoionico, cioè sull'emissione di una radiazione (elettronica) da una lamina di metallo (catodo) riscaldata, posta all'interno di un tubo di vetro dove è stato praticato il vuoto. La radiazione catodica provoca la polarizzazione negativa di un'altra lamina (anodo).²⁵ Tali ricerche – rese vivaci da

²³ Ottengo questa stima alla buona, pensando al lavoro che compiono le braccia umane per sollevare una massa di 50 kg per l'altezza di un metro, pari a $(50 \cdot 9,81 \cdot 1)$ joule. Cannon non discuteva i livelli di lavoro degli effettori nell'uomo.

²⁴ Il verbo “feeding-back” si ritrova, per esempio, in un articolo del primo numero del *Bell System Technical Journal* del novembre 1922 dedicato alle trasmissioni radio [cfr. Espenschied 1922]; il termine “feed-back”, quasi sempre nella forma sostantivata si ritrova ben 28 volte (una volta anche “negative feed-back”) nel primo numero della stessa rivista l'anno successivo, in un articolo dedicato alle applicazioni delle valvole termoioniche ed in particolare degli amplificatori [King 1923].

²⁵ Studiati da J. Plücker (1801-68) e J. W. Hittorf; E. Goldstein (1850-1930) modello ondulatorio, difeso anche da Hertz e modello particellare C. Varley (1828-83) difeso anche da W. Crookes. G.F.Fitzgerald (1851-1901) [EST 1975, p. 483, p. 526, p. 549-550].

un'accesa disputa tra fisici corpuscolaristi e ondulatori – furono fondamentali per la scoperta degli elettroni,²⁶ ma l'uso dei tubi a vuoto a fini tecnologici dovette aspettare cinquant'anni. Solo nel 1904, infatti, l'ingegnere inglese John A. Fleming (1849-1945), della Marconi Corporation, brevettò una valvola termoionica dotata di un catodo e di un anodo (che in seguito verrà chiamata diodo) [cfr. EST 1977, p. 69], da utilizzarsi come raddrizzatore del segnale radio ricevuto. Un ulteriore miglioramento venne nel 1906 dall'ingegnere statunitense Lee De Forest, che brevettò un tubo a vuoto da usarsi come amplificatore. Questo tubo era dotato di un terzo elettrodo consistente in una griglia interposta tra anodo e catodo. Brevettato inizialmente come Audion, fu in seguito conosciuto come triodo.²⁷

Quando la griglia di un triodo ha un andamento di tensione positivo, sull'anodo compare una tensione amplificata, ma ad andamento negativo: è questo il funzionamento di un amplificatore a triodo semplice. Se si accoppiano anodo e griglia, i due segnali si sottraggono e questo montaggio viene chiamato *feedback* negativo. Se invece si pone un secondo stadio di amplificazione in cascata rispetto al primo e si accoppia l'anodo del secondo triodo con la griglia del primo, i due segnali si sommano e si ha un *feedback* positivo [cfr. Rubin 1968, p. 14].²⁸ *Feedback* potevano manifestarsi anche a causa di fenomeni indesiderati di accoppiamento parassitico.

Intorno al 1912 si scoprì che il *feedback* positivo poteva essere usato per migliorare il guadagno degli amplificatori a triodi ed anche per creare degli oscillatori.²⁹ Generalmente il *feedback* positivo in un circuito a triodo produce facilmente un disturbo sonoro detto “*singing*”, che corrisponde ad un fenomeno oscillatorio e che è il parallelo elettrico dell'*hunting* nel *Governor* (fatto che naturalmente venne compreso solo quando le teorie delle due branche tecnologiche si fusero). Controllando opportunamente le frequenze utilizzate, il circuito elettrico può divenire stabile anche in presenza di *feedback* positivo, permettendo anzi un guadagno d'amplificazione accresciuto.³⁰ Questo circuito venne denominato “regenerative receiver” ed in tal senso si parlò anche di “*regenerative feedback*” [*feedback* rigenerativo], come sinonimo di *feedback* positivo.³¹ Accrescendo ulteriormente il *feedback* positivo si trovò il modo per sfruttare a favore del progettista la tendenza del circuito ad oscillare e si ottenne un ottimo oscillatore per la radiotrasmissione che soppiantò i vecchi rudimentali metodi.

Negli anni Venti, in radiotecnica si cominciò a comprendere anche l'utilità del *feedback* negativo nel ridurre i disturbi.³² Tuttavia la piena comprensione dell'importanza del *feedback* negativo e lo sviluppo di efficaci tecniche analitiche per il suo uso discendono dal campo delle comunicazioni telefoniche su lunga distanza, e si devono principalmente a Harold S. Black, che

²⁶ Che prevedevano un atomo con elettroni ruotanti o intorno ad un nucleo positivo o in una atmosfera positiva. La stessa scoperta dei raggi x da parte di W. C. Röntgen è legata a queste ricerche visto che l'emissione x è provocata da raggi catodici. [cfr. EST 1975, pp. 576-7].

²⁷ In esso l'anodo ha un potenziale positivo rispetto al catodo (è polarizzato positivamente), mentre la griglia ha una forte polarizzazione negativa che impedisce l'emissione degli elettroni dal catodo; accade però che la griglia permetta più o meno elettroni passano alterando di poco il potenziale di griglia, cosicché piccole variazioni di esso permettono di controllare grandi correnti anodiche. Cfr. l'articolo Terry J. Scheffer, “Electronics” in [EB 97].

²⁸ Possono essere posti in cascata anche molti triodi, ma in numero pari.

²⁹ L'invenzione fu disputata a lungo tra De Forest, Meissner, Edwin H. Armstrong e Franklin. La Corte Suprema degli Stati Uniti decise in favore di De Forest nel 1934.

³⁰ Cfr. US Patent nr 1.113.149, di Edwin H. Armstrong.

³¹ In questa tecnica il *feedback* positivo veniva interrotto non appena il circuito iniziava ad oscillare, operazione che avveniva a frequenze non udibili dall'ascoltatore.

³² Si possono citare le applicazioni per ridurre gli effetti provocati dalle capacità parassite che compaiono tra gli elettrodi del triodo alle alte frequenze, in particolare il “neutrodyne receiver” di Hazeltine, oppure il controllo automatico di volume (AVC) introdotto da Wheeler nel 1926.

introdusse l'amplificatore a *feedback* negativo, e a Nyquist che nel 1932 introdusse il criterio di stabilità che porta il suo nome [cfr. ad es. Brezzi 1975, pp. 24-25].

Black e Nyquist lavoravano entrambi per i Bell Laboratories che conducevano le ricerche per la AT&T, compagnia con il problema di sviluppare amplificatori per linee telefoniche molto lunghe. In particolare numerose conversazioni telefoniche erano inviate contemporaneamente sulla stessa linea telefonica mediante il sistema multiplex, procedura che richiedeva l'utilizzo di molti amplificatori lineari a guadagno costante posti sullo stesso cavo. Harold Black ebbe l'idea di progettare un amplificatore ad uno stadio in cui il segnale amplificato in uscita veniva prelevato, attenuato e ricondotto in ingresso per essere sottratto, dunque dotato un *feedback* negativo. Il circuito che ne risultò era ancora un buon amplificatore, sebbene con un guadagno minore, ma molto meno disturbato. Il brevetto di Black fu registrato nel 1932.³³ L'articolo in cui Black presenta la sistemazione della materia è del 1934. David A. Mindell ha notato che sebbene Black parlasse di “Stabilized Feed-Back Amplifiers”, questi non aveva in mente la nozione di stabilità che già abbiamo visto emergere nel controllo automatico, quanto piuttosto un sistema più robusto, meno soggetto a cambiamenti dei parametri a causa di pioggia ed età del dispositivo [cfr. Mindell 2002, p. 121]. In generale un amplificatore a *feedback* negativo ha minori disturbi e distorsioni rispetto ad un amplificatore non retroazionato o retroazionato positivamente, ma la stabilità nel senso della capacità di ritornare alle condizioni iniziali dopo una perturbazione non è di per sé garantita dalla retroazione negativa e, come racconta Bode (1960), i primi prototipi di Black erano ancora soggetti ad instabilità nella forma del “singing”.

La svolta si ebbe con l'introduzione del criterio di Nyquist nel 1932, che non solo offrì, come già faceva il metodo di Routh-Hurwitz, una procedura per determinare se il sistema fosse o no stabile, ma permise anche di calcolarne il grado di stabilità, offrendo una guida per la progettazione di sistemi stabili.³⁴

Il metodo di Nyquist e Küpfmüller

Il metodo di Nyquist, sviluppato da Harry Nyquist ai Bell Laboratories, e parallelamente da Karl Küpfmüller in Germania presso i laboratori della Siemens [cfr. Segal 2003, p. 150], tratta il problema della stabilità negli amplificatori reazionati mediante un approccio frequentistico. Ne daremo una illustrazione nel caso più semplice allo scopo di farne comprendere lo spirito. Si faccia riferimento al diagramma a blocchi di *figura 1* dato all'inizio del capitolo, che può bene essere riferito ad un amplificatore reazionato. Il metodo richiede che si tracci nel piano complesso il grafico del guadagno ad anello aperto \overline{AH} , cioè il prodotto dell'amplificazione senza *feedback* \overline{A} per la funzione di trasferimento del blocco di *feedback* \overline{H} , che sono entrambe grandezze complesse (circostanza che indichiamo con il trattino superiore). Si fa questo per tutto lo spettro di frequenze da $-\infty$ a $+\infty$, ottenendo una curva chiusa, come in *figura 3*. Il criterio prevede che se la curva non comprende il punto $1 + j0$, allora il sistema è stabile. In caso contrario, per rendere stabile il sistema si può “modellare” la curva. Il modo più immediato portebbe a diminuire il guadagno d'anello aperto fino a tener fuori il punto $1 + j0$ (come avviene nella curva tratteggiata di *figura 4*), rinunciando però ad una parte dell'amplificazione che il dispositivo può fornire. Al contrario (cfr. *figura 5*) è possibile modellare la curva in maniera tale da diminuire il guadagno ad anello aperto solo per alcune frequenze, e ciò si ottiene generalmente aggiungendo circuiti dotati di elementi passivi, costituiti ad esempio da resistenze e capacità.

³³ US patent nr. 2.102.671.

³⁴ Fu in seguito mostrato da MacColl (1945) che tale risultato può di fatto essere facilmente ottenuto da un teorema di Cauchy o dal Principio dell'Argomento dell'analisi complessa.

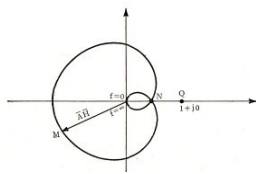


Fig. 3 - Diagramma di Nyquist di un sistema stabile.

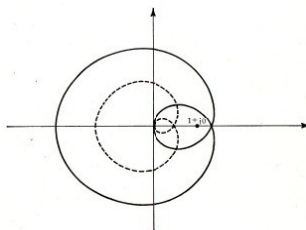


Fig. 4 - Sistema stabilizzato mediante riduzione del guadagno di anello.

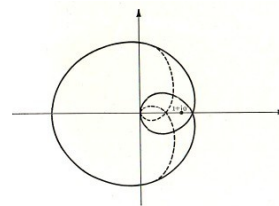


Fig. 5 - Sistema stabilizzato mediante una rete stabilizzatrice.

È bene ribadire che questo metodo fu introdotto al solo fine di studiare e progettare amplificatori reazionati, ignorando nella maniera più assoluta che esso poteva riguardare sistemi di controllo come *governors*, piloti automatici, servomotori retroazionati ecc. Solo dopo che si comprese che questi ultimi erano trattabili alla stregua dei primi, si ottenne la possibilità di estendere tutta la strumentazione teorica dell'ingegnere delle comunicazioni ai problemi dell'ingegnere dei servomeccanismi. Così l'analisi e la progettazione dei dispositivi di controllo poté utilizzare i metodi frequentistici come lo studio della risposta in frequenza, il metodo di Nyquist, ed altri metodi elaborati nello stesso spirito. Divenne usuale studiare la risposta in frequenza di dispositivi di controllo meccanici, come se fossero sistemi elettrici o acustici. I diagrammi a blocchi divennero ideali anche per l'ingegnere dei controlli automatici ed il *feedback* divenne il nome giusto da dare allo stesso concetto sepolto da secoli nelle nebbie delle pratiche dei servomeccanismi. Complessivamente tale sintesi è conosciuta oggi come "Teoria Classica dei Controlli", in contrapposizione alla "Teoria Moderna dei Controlli" (conosciuta in ambito controllistico come "Teoria dei Sistemi"), che le venne affiancata sul finire degli anni Cinquanta.

Sebbene piuttosto trascurata dagli epistemologi, la sintesi teorica rappresentata dalla "Teoria Classica dei Controlli", rappresenta uno dei più eleganti esempi di integrazione tra due teorie, paragonabile a mio parere per bellezza alla integrazione tra fisica terrestre e celeste compiuta da Copernico, Galilei, Keplero e Newton, oppure alla riduzione della termologia e della termodinamica alla meccanica mediante la teoria cinetica della materia e la meccanica statistica. Alla riuscita di questa integrazione contribuirono in maniera significativa la ricerca sulla previsione ed il filtraggio di Wiener, e tale integrazione fu colta da Wiener come la prima tappa verso il costituirsi della Cibernetica.

La teoria dei Sistemi dinamici

Prima di passare all'esame del modo in cui questo processo di fusione tra due teorie sia avvenuto e di indagare in che misura Wiener e la Cibernetica vi abbiano contribuito, vorrei aggiungere alla nostra breve storia dei controlli automatici anche un cenno allo studio dei processi non lineari. È bene chiarire infatti che la bella fusione teorica a cui abbiamo accennato si riferisce soltanto a sistemi lineari, ai quali soltanto si possono applicare segnali di prova di tipo sinusoidale. Nel caso non lineare ciò è possibile, circostanza di cui Wiener era perfettamente consapevole.

Come hanno mostrato David Aubin e Amy Dahan Dalmedico (2002), in uno studio molto approfondito di questo filone di ricerca, esso ha preso nel tempo diverse denominazione: "Teoria dei Sistemi dinamici" (*Dynamical systems theory*), "Sistemi dinamici non lineari", fino ad essere presentato recentemente come una teoria affatto nuova col nome di "Teoria del caos" (*Deterministic chaos theory*) [cfr. ad es. James Gleick 1987, p. 6]. In realtà dalle questioni sulla

stabilità delle orbite celesti a cui aveva cominciato ad interessarsi Maxwell si distaccò presto un fondamentale ramo di ricerca con interesse per la stabilità delle equazioni differenziali, specialmente per quelle non lineari.

Lo studio della nozione globale di stabilità di Henry Poincaré mediante metodi qualitativi fu proseguito prevalentemente nella Mittel Europa e in Russia. Fu proseguito in Russia da Aleksandr Lyapunov (1857–1918) [cfr. in particolare Lyapunov 1892] e poi da Aleksandr Andronov (1901-1952), che capeggiò la Scuola di Gorki, fiorita in URSS negli anni Trenta e Quaranta,³⁵ formata da matematici puri e applicati, fisici, ingegneri, concentrata sullo studio delle oscillazioni non lineari, con un interesse focalizzato sui controlli automatici e sulla radiotecnica. Quest'ultima esperienza risultò estremamente utile nell'immediato dopoguerra per lo studio della matematica non lineare alla base delle applicazioni nucleari. Negli anni Trenta si sviluppò anche una scuola a Kiev ed una terza ad opera di Andrei N. Kolmogorov. Tutti questi studiosi andarono a formare il nucleo duro della Cibernetica sovietica.

Costituisce una tradizione parallela a quella russa, l'attività di Balthasar Van der Pol (1899-1959), fisico di Utrecht che si perfezionò presso il Cavendish laboratory di Cambridge (UK), per tornare in Olanda dove ebbe una lunga carriera accademica, accanto ad un impiego come capo del reparto di radiotecnica dei Philips Research Laboratories di Eindhoven. [cfr. Israel 1998]

Dopo la Seconda guerra mondiale, anche per merito di una strenua opera di traduzione dal russo in inglese, tali filoni di studi confluirono negli Stati Uniti, a formare un campo di studi prediletto da matematici come Norman Levinson, allievo e amico di Wiener, e Stephen Smale. Wiener non ignora queste ricerche. Nel capitolo di *Cybernetics* in cui si illustra la nozione di *feedback* egli mostra di essere a conoscenza sia delle ricerche di Poincaré che di quelle di Van der Pol [cfr. Wiener 1948, p. 110]. In ogni caso già nel 1942 Wiener era stato autore di un rapporto di guerra finalizzato allo studio dei sistemi non lineari mediante la risposta ad un segnale di prova costituito da rumore bianco [cfr. *Wiener's Response of a non-linear device*]. Infine nell'introduzione alla seconda edizione di *Cybernetics*, del 1961, ha la massima premura di sottolineare come allora la nozione di non linearità avesse profondamente modificato e complessificato l'approccio originario della Cibernetica. In ogni caso ai fini della nostra ricostruzione della Cibernetica possiamo prescindere da questi sviluppi.

³⁵ Cfr. Bissell (2001), Diner (1992), Dahan Dalmedico (1994 e 1996b).

Capitolo 2 - Le Ricerche sui predittori antiaerei

«[Pure mathematicians] dive deep into the entirely man-made world of pure and rigorous mathematics, full of entities and relations which have a logical sense but no possible physical sense, and they come up from their deep dive with a pocketful of practical treasures. I do not understand this, nor would I believe anybody who claims to understand it. I just take it as an empirical fact, and quote Norbert Wiener as a proof.

The principal achievement of Norbert Wiener is that he has established the link between statistical phenomena and the arts of communication and control. The way in which he did this was very characteristic of him; he started by reconciling statistical mechanics with pure mathematics.» [Gabor 1965, p. 525]

Il problema della difesa antiaerea e la Home Chain inglese

Le procedure organizzative e le istanze strategiche e tattiche della Seconda guerra mondiale ebbero grande rilevanza nella Cibernetica *in fieri*. Perciò è opportuno soffermarsi su tali aspetti di contesto.

L'uso dell'aereo come arma da guerra, introdotto già durante la Prima guerra mondiale, aveva posto nuovi problemi all'artiglieria. In questo caso, a differenza del fuoco verso navi, si trattava di muovere velocemente e con un adeguato anticipo [*“lead”* in inglese] dei pezzi pesanti, il cui calibro doveva aumentare nella misura in cui crescevano la quote di crociera degli aerei nemici. Alle soglie della Seconda guerra mondiale le difese antiaeree erano basate su sistemi muniti di un numeroso equipaggio, che individuavano l'aereo dal rumore, puntavano verso di esso con telescopi e, di notte, anche con riflettori, che aggiustavano la mira con l'ausilio di sistemi automatici per calcolare l'anticipo, detti “predictors” dagli inglesi e “directors” dagli statunitensi [cfr. Bennett 1993, p. 116]. D'altro canto erano stati anche introdotti bombardieri d'alta quota, molto veloci e a basso rumore, che neutralizzavano abbondantemente queste difese.

Nella seconda metà degli anni Trenta era anche emersa una nuova tecnologia basata su dispositivi in grado di emettere microonde, cioè radioonde con frequenze superiori a circa 230 MHz, e di rivelarne gli effetti di riflessione, segnalando la posizione di oggetti a distanza. Fu denominata inizialmente RDF (Radio Direction finding) e, dal 1941, RADAR (Radio Detecting And Ranging) [cfr. *ivi*].

La vulnerabilità della contraerea, specialmente rispetto all'aeronautica tedesca, spaventava da tempo gli inglesi, tanto che nel 1934 il fisico F. A. Lindemann aveva rivolto a Winston Churchill un pubblico appello perché si avviassero ricerche per sistemi antiaerei utilizzando il radar.³⁶ In risposta era nato nel gennaio 1935 il Committee for the Scientific Survey of Air Defence, conosciuto poi come Tizard Committee [cfr. *ivi*].

In realtà l'unico antidoto contro i bombardieri era allora rappresentato da una rapida reazione mediante aerei da caccia e, piuttosto che aspettare lo sviluppo di efficienti radar per determinare precisamente la posizione degli aerei, gli inglesi escogitarono sistemi mediante i quali inondare il cielo di onde radio con una rete di radio-stazioni, la cosiddetta “Home Chain”,

³⁶ Considerato inizialmente solo come un disturbo, questo effetto era poi stato utilizzato concretamente da Appleton nel Regno Unito per misurare distanze tra oggetti e da Breit e Tuve negli USA per misurare l'altezza della ionosfera.

per permettere così la segnalazione della direzione verso cui mandare i caccia in caso di *raids* aerei, informazioni che venivano inviate anche agli addetti ai sistemi antiaerei terra-aria [cfr. *ivi*].

Alcune delle stazioni radar dell'*Home Chain*, a cominciare dalla Bawdsey Research Station, divennero anche sedi di ricerca sulle applicazioni radar [cfr. *ivi*, p.118]; un metodo che negli anni della Guerra fredda servirà da modello agli Stati Uniti per il progetto SAGE.

I preallarmi della Home Chain si rivelarono decisivi quando il 10 luglio 1940 la Germania hitleriana intraprese la cosiddetta Battaglia d'Inghilterra ("The Battle of Britain"). Gli attacchi erano basati sul bombardamento strategico, volto ad annientare la capacità di reazione dell'aviazione nemica, prima che essa prendesse il volo e, insieme, per piegare il morale della popolazione onde sollecitare la resa. Essi si protrassero senza successo fino al dicembre del 1940 [cfr. ad es. Holland 2011].

La creazione dell'NDRC

Gli Stati Uniti entrarono in guerra solo il giorno successivo all'attacco di Pearl Harbor del 7 dicembre 1941, ma la mobilitazione iniziò in grande stile nel 1940, con una organizzazione molto managerializzata dell'intera scienza americana, sia civile che militare, in cui un ruolo di spicco ebbe Vannevar Bush (1890-1974). Docente all'MIT dal 1919, Bush ne era stato preside della facoltà di ingegneria nonché vicerettore, incarichi che abbandonò nel 1938 quando fu chiamato a presiedere la Carnegie Institution di Washington.³⁷ Nel 1939 divenne anche presidente del National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), l'ente che nel dopoguerra diverrà la NASA.³⁸

Non fosse che per le informazioni che aveva a disposizione per via di quest'ultimo incarico, Bush aveva perfettamente presenti i problemi della fragilità della contraerea di fronte ai progressi dell'aeronautica. Nel 1939 comunicava queste preoccupazioni a Herbert Hoover, ex presidente degli Stati Uniti nonché ingegnere, sottolineando il fatto che non esisteva un coordinamento delle ricerche sul radar in corso all'MIT e a Stanford per ottenerne "the precise and rapid control of guns".³⁹ Comunicò gli stessi dubbi a Frank Jewett, fondatore e presidente dei Bell Laboratories.⁴⁰ Infine, nella primavera del 1940, insieme ad altri studiosi con alti incarichi amministrativi, inviò al presidente Franklin D. Roosevelt una memoria sollecitandolo a creare un analogo dell'NACA per la Marina e l'Esercito, con l'obiettivo principale della difesa antiaerea.⁴¹

Il 27 giugno 1940 Roosevelt, accogliendo la proposta, istituì l'NDRC (National Defence Research Committee) allo scopo di coordinare e finanziare le attività di ricerca di interesse militare della Marina e dell'Esercito con quelle condotte presso enti di ricerca civili, principalmente università e compagnie private [cfr. Roosevelt 1940].⁴²

Il ristrettissimo comitato, posto sotto la direzione di Bush, era composto da sei divisioni, al vertice delle quali erano, tra gli altri, il preside della Graduate School del CalTech, Richard C. Tolman, il rettore di Harvard James B. Conant e quello dell'MIT Karl T. Compton. A

³⁷ Bush presiedette la CIW dal 1939 al 1955.

³⁸ Cfr. su Vannevar Bush si veda Wiesner (1979), nonché la recente biografia di Zachary (1997) e l'interessante recensione di quest'ultima di Koistinen (1998).

³⁹ Lettera di Bush a Hoover, 10 aprile 1939; cfr. lettera di Bush a Hoover 29 aprile 1939 (BALC), cito da Mindell (1995b, p. 91).

⁴⁰ Lettera di Bush a Jewett, 23 marzo 1939 (BACIW), Jewett folder, cito da Mindell (1995b, p. 91), che cita a sua volta da Pursell (1979, p. 360).

⁴¹ Bush, "Draft Memorandum," NARA OSRD papers, Group 227. Central Classified File. Organization, cito da Mindell (1995b, p. 91).

⁴² Ordinanza presidenziale presa in accordo con il Generale Marshall e l'Ammiraglio Stark.

quest'ultimo era data la presidenza della Divisione D "Rilevamento, Controlli automatici e Strumentazione", che si sarebbe occupata del settore maggiormente strategico in quel momento, e di fatto l'MIT divenne il luogo cardine delle ricerche dell'NDRC. Un'altra divisione era presieduta da Frank B. Jewett, che era il presidente della National Academy of Sciences e presiedeva i Bell Telephone Laboratories, giuridicamente una compagnia indipendente, ma il cui pacchetto di maggioranza era detenuto dalla AT&T.⁴³

Le pratiche dell'NDRC

L'NDRC aveva una forte rilevanza economica, in quanto attraverso di esso il governo federale finanziava contratti di ricerca e sviluppo, sottoscritti con imprese private o enti di ricerca pubblici. L'ammontare di tali fondi ammontò nel quinquennio 1940-1945 a complessivi 500 milioni di dollari.⁴⁴ qualcosa forse come 100 miliardi di attuali dollari.⁴⁵ Al confronto, ad esempio, con il recente piano Paulson di 700 miliardi di dollari,⁴⁶ può sembrare una cifra non esorbitante, ma occorre considerare che il dato si riferisce soltanto a investimenti per contratti di R&D, e che dietro ogni progetto accettato c'erano poi ingenti commesse delle forze armate.

Per quanto riguarda il *modus operandi*, si prevedeva che la produzione dei dispositivi emergenti dai contratti sottoscritti dall'NDRC fosse affidata all'esterno, mentre il comitato si sarebbe occupato essenzialmente della ricerca e sviluppo, attività che generalmente esso svolge supervisionando ricerche date in appalto esterno, principalmente ad enti di ricerca pubblici o a laboratori di compagnie private. Un'eccezione a quest'ultima regola furono le ricerche che si svolsero all'MIT, soprattutto quelle all'interno del Radiation Laboratory, appositamente costituito per le ricerche sul Radar.

Sebbene in seguito, e specialmente con la costituzione nel giugno 1941 dell'OSRD (Office of Scientific Research and Development), ci fu un riequilibrio degli interessi in gioco, c'era all'inizio un evidente squilibrio in favore di alcune università e di una sola compagnia privata, un azzardo che Bush riconobbe apertamente nell'autobiografia scrivendo:

«There were those who protested that the action of setting up NDRC was an end run, a grab by which a small company of scientists and engineers, acting outside established channels, got hold of the authority and money for the program of developing new weapons. That, in fact, is exactly what it was. Moreover, it was the only way in which a broad program could be launched rapidly and on an adequate scale. To operate through established channels would have involved delays – and the hazard that independence might have been lost, that independence which was the central feature of the organization's success.» [Bush 1970, pp. 31-32].

Bush giustificava quest'operato con il fine di aver voluto offrire alla nazione uno strumento agile per lo sviluppo rapido di armi e sulla scala opportuna. La creazione dell'NDRC rimodellò non soltanto la scienza, ma anche l'intera società statunitense, in quanto diede luogo a quello

⁴³ Sulla prima composizione dell'NDRC cfr. Hollcroft (1940), p. 862 e, tra gli altri, Wiesner (1979), p. 95. I BTL erano dalla fine dell'Ottocento il reparto di R&S dell'AT&T, cioè del risultato della fusione tra la Bell Telephone Company, interessata ai telefoni e la Western Electric, interessata alle comunicazioni telegrafiche su lunga distanza. Nel 1925 i BTL avevano assunto l'assetto giuridico di compagnia autonoma, ma l'AT&T era restata il loro azionista di riferimento. Cfr. [EB97], voce "AT&T Corporation". Frank B. Jewett (1879-1949) fu il presidente dei BTL dal momento di questa trasformazione nel 1925 fino al 1940. Al momento della nomina a membro dell'NDRC, egli era ancora presidente ["president"] dei BTL, come si legge nel comunicato che esce su *Nature* [NV 1940]. Dal 1940 al 1944 fu comunque capo ["chairman"] del Board of Directors, cioè del loro Consiglio d'Amministrazione, cfr. Brittain (2007, p. 455).

⁴⁴ Cfr. Stewart (1948, p. 322).

⁴⁵ Per una rivalutazione ai valori attuali forse si potrebbe moltiplicare questa cifra per 10 o per 20. Per avere un vago riferimento per queste cifre, si consideri che uno stipendio medio mensile nel 1940 era di circa 120 dollari, [cfr. Grosh 2003, p. 47]. Vedi anche i dati riportati in ACH (1999). Nel progetto di ricerca di Wiener un mese-uomo era valutato 150 dollari.

⁴⁶ Cfr. Emergency Economic Stabilization Act of 2008. H.R. 1424, <http://www.govtrack.us/congress>

che, non solo storici e sociologi, ma anche il presidente Eisenhower, hanno chiamato il “military-industrial complex”,⁴⁷ cioè un assetto in cui i fini delle *élites* politiche, economiche e militari tendono a integrarsi diventando funzionali le une alle altre. Tale quadro – a mio avviso – si venne a creare in maniera pressoché naturale come prosecuzione nel tempo di guerra delle politiche keynesiane del *New Deal*, avviate per uscire dalla Grande Depressione, e caratterizzate da un’amplissima spesa pubblica per investimenti, guidata da un esecutivo molto forte. Le pratiche adottate, inoltre, favorirono l’emergere di grandi centri di ricerca e di progetti di ricerca che, per impiego di risorse e di uomini, non si erano mai visti in precedenza dando luogo alla cosiddetta “Big science,” che si perpetrò nel dopoguerra.⁴⁸

Per effetto della creazione dell’NDRC, la scienza statunitense assunse una struttura centralizzata e venne sottoposta a procedure gerarchiche strettamente controllate. Come spiega Bush a Roosevelt nel *Report for the First Year*, illustrante i risultati del primo anno di attività dell’NDRC,

«Highly secret matters are handled by carefully restricted special groups. There is a rule that no man in the organization learns of confidential matters except as is necessary to his proper functioning. Proper rules in regard to the handling of documents, etc., are enforced.» [p. 4]

Ogni progetto, dopo l’accettazione da parte dell’NDRC, veniva sottoposto a segreto militare, così come avveniva per i successivi rapporti prodotti nel quadro dei progetti accettati. Dei rapporti venivano riprodotte un numero definito di copie, diffuse secondo dettagliate liste di distribuzione ed i destinatari erano impegnati a non dare ad altri la propria copia, ed a non divulgarne il contenuto nemmeno in maniera parziale.⁴⁹

Nonostante questi rigidi vincoli di segretezza, i risultati delle ricerche circolavano velocemente negli USA e nel Regno Unito. L’NDRC manteneva infatti strette relazioni con la sua controparte britannica, il British Central Scientific Office (BCSO), ed aveva stabilito un proprio ufficio a Londra,⁵⁰ come pure il BCSO fece a Washington dall’aprile 1941 [cfr. Baxter 1946, p. 123]. Avveniva spesso anche uno scambio di personale tra i due paesi e, per certi versi, la circolazione delle conoscenze avvenne anche più celermente di come sarebbe potuto avvenire negli anni precedenti, sebbene solo coloro che erano posti ai vertici della piramide avessero un accesso più ampio alle informazioni rilevanti.

Gli obiettivi strategici dell’NDRC

Come si evince dal *Bush’s Report for the First Year*, il problema della difesa antiaerea aveva modellato tutta la politica di ricerca dell’NDRC del primo anno di attività. Bush citava nel documento anche l’esito della Battaglia di Inghilterra, a conferma dell’importanza strategica di questa scelta [p. 4]. Si elencavano come

«More Important Programs of Research and Development» i seguenti: «a. Aircraft detection, and its resulting developments; b. gun control; c. proximity fuses; d. anti-submarine devices; e. explosives and gases; f. Uranium.» [p. 6].

⁴⁷ Cfr. l’*Eisenhower’s farewell address*. Circa il nesso tra Bush e il complesso militare-industriale si vedano in particolare Koistinen (1965; 1980; 2004). Per il periodo immediatamente successivo cfr. Leslie (1992).

⁴⁸ Il termine “Big Science” fu introdotto da Weinberg (1961), allora direttore dell’Oak Ridge National Laboratory, facendo esplicito riferimento ai lavori condotti sul radar, prevalentemente presso l’MIT Radiation Laboratory ed al Progetto Manhattan. L’articolo rivelava una certa nostalgia per la “Little Science,” dove lo scienziato indipendente era libero di lavorare da solo o con qualche *graduate student*, su problemi da lui scelti. [Cfr. Dennis 2010]. Sulla Big science l’antologia Galison Hevly (1992), nonché su recenti grandi progetti Smith (1989), per i telescopi spaziali, mentre Kevles e Hood (1992), per il progetto genoma. Va ricordato comunque che Wiener già in the *Human Use of Human Beings* [Wiener 1950], discute questo concetto, che in *Invention* [Wiener 1993] chiama scienza dei “megabuck”, cioè dei megadollari [Cfr. Montagnini 2005, p. 258].

⁴⁹ Cfr. ad es. la dicitura apposta in alto a destra della prima pagina del *Wiener’s Final report*.

⁵⁰ Cfr. *Bush’s Report for the First Year*, p. 5.

I primi tre punti erano essenzialmente connessi alla difesa aerea (le spolette di prossimità, utilizzanti radiorilevatori, servivano ad aumentare l'efficacia della contraerea); il quarto punto, si ricollegava alle ricerche sul radar, per quel che concerne il sonar. Il fatto che l'“Uranio” fosse elencato in coda non è casuale: ciò rivela l'attenzione di basso profilo riservata inizialmente al progetto, che confliggeva con la logica di puntare su ricerche di breve periodo, finalizzate ad applicazioni rapide, da mandare al più presto in produzione.

La Divisione D si articolava nelle seguenti Sezioni: D-1 (*Detection*); D-2 (*Controls*); D-3 (*Instruments*); D-4 (*Heat Radiation*). Le prime due ebbero in assoluto un grande rilievo, e ne hanno uno particolare per la storia della Cibernetica perché le ricerche di Wiener ebbero relazioni con entrambe, sebbene ci focalizzeremo soprattutto sulla D-2.

La Sezione D-1 coordinava le ricerche sui sistemi radar, che venivano svolte in gran parte nel Radiation Laboratory creato a questo scopo all'MIT, e diretto dal presidente della D-1, il fisico e uomo d'affari Alfred L. Loomis. La Sezione D-2 si occupava, invece, del controllo automatico del tiro, in particolare dei sistemi per il calcolo della posizione dell'oggetto su cui sparare e dei servomeccanismi per la manovra dei pezzi. Nei primi due anni di attività dell'NDRC al suo vertice fu posto Warren Weaver (1894-1978), nominato nel luglio 1940. Questi era un fisico di formazione che dal 1932 era direttore della divisione di Scienze Naturali della Rockefeller Foundation ed aveva avuto a lungo rapporti con Vannevar Bush, in quanto dal 1935 la sua divisione della Rockefeller finanziava il progetto per un nuovo analizzatore differenziale per l'MIT. Gli altri membri della D-2 erano: come vice-presidente, Thornton C. Fry, direttore del dipartimento per le ricerche matematiche dei BTL; come capo aiuto tecnico, Edward J. Poitras, uomo di fiducia di Weaver [cfr. Weaver 1977], ex-allievo di Bush e Hazen, che si era occupato dei sistemi di controllo dell'osservatorio del Monte Palomar, altro progetto finanziato dalla divisione della Rockefeller di pertinenza di Weaver, e infine Samuel H. Caldwell, unico membro effettivo, responsabile del centro di calcolo dell'MIT, nel quale venivano sviluppati sistemi analogici di calcolo, come gli analizzatori differenziali, insieme ad un progetto per un calcolatore digitale.⁵¹

La Sezione operò supervisionando contratti appaltati con sede in genere esterna all'MIT, a parte quello del piccolo gruppo di Wiener e Julian Bigelow, che lavorarono prevalentemente all'MIT, e quelli del Servomechanisms Laboratory di Gordon Brown e dell'Instrument Laboratory del Dipartimento di Ingegneria Aeronautica di Stark Draper, che però svolsero molte delle loro attività presso i laboratori della Sperry Corporation.

Chi era Norbert Wiener?

Ci soffermeremo qui principalmente su una ricerca condotta per conto dall'NDRC, quella sui predittori, ed in particolare ma non in maniera esclusiva su quella di Norbert Wiener, in quanto essa costituì la base da cui scaturirono le idee di Wiener sulla Cibernetica, che divennero la traccia per l'aggregazione del movimento cibernetico.⁵²

Nel 1940 Norbert Wiener (1894-1964) aveva 46 anni, era *full professor* presso il Dipartimento di Matematica dell'MIT, dove lavorava da 21 anni, con un'ottima fama entro una ristretta cerchia mondiale di matematici interessati a temi connessi ad analisi funzionale,

⁵¹ A questi nomi si aggiungeva come unico consulente il fisico Arthur Hardy, come si evince dall'organigramma della Sezione D al 1° giugno 1941 (FDRPL). Non sappiamo come mai fosse nella sezione D-2 un uomo come Hardy, esperto di spettrofotometria [cfr. Johnston 2001], che ci si aspetterebbe di trovare alla Sezione D-4 (Infrared), dove invece, curiosamente, troviamo elencati tra i consulenti Norbert Wiener, Harold Hazen e Charles Stark Draper.

⁵² Le principali biografie di Wiener sono Heims (1980) e Masani (1990), che integrano l'autobiografia in due tomi [Wiener 1953 e 1956]. Agli aspetti filosofici della formazione e delle ricerche di Wiener è principalmente dedicate la monografia *Le Armonie del Disordine* [Montagnini 2005].

probabilità ed a quelli che oggi chiamiamo “processi stocastici”. Era anche un filosofo di formazione e per un breve periodo lo era stato anche di professione, prima di scegliere definitivamente di diventare matematico a tempo pieno nel 1919, quando entrò all’MIT. Questa dimensione filosofica lavora nel profondo della sua matematica per venire alla luce prepotentemente negli anni della Cibernetica. Ottenuto il *B.S.* in matematica a 14 anni, si era orientato verso la filosofia, campo in cui ottenne il *Ph.D.* nel 1913, a Harvard. Fu avviato alla logica da un filosofo idealista aperto alla scienza come Josiah Royce, con il quale si addottorò. Seguì un biennio postdottorale tra il 1913 e il 1915 al Trinity College di Cambridge (UK), presso Bertrand Russell, periodo intervallato da un semestre a Göttingen presso Edmund Husserl e da un incontro con Frege, che si concluse alla Columbia University, presso John Dewey.

Tra il 1916 e il 1919, Wiener approfondì gli studi matematici in senso stretto, che in realtà non aveva mai abbandonato e, anzi, aveva portato avanti ad un livello molto formale. A Cambridge era stato allievo di G. H. Hardy, esperto di teoria dei numeri, a Göttingen di Hilbert e di Landau. Nel 1920 lo troviamo con Fréchet all’Università di Strasburgo; in collaborazione con lui perviene ad una teoria assiomatica per quegli spazi a cui, negli stessi mesi ed in maniera sicuramente indipendente, giunge anche il matematico polacco Stefan Banach, e che saranno poi conosciuti solo col nome di quest’ultimo [cfr. Wiener 1956, pp. 50-51 e 60].

Entrando al Dipartimento di matematica dell’MIT, che allora era essenzialmente un dipartimento di servizio per la formazione degli ingegneri, a Wiener venne chiesto di occuparsi essenzialmente di matematica applicata, cosa che egli fece, ma in maniera molto originale, in quanto avviò un percorso di ricerca che lo condusse a portare all’interno della matematica degli ingegneri il rigore proprio dei matematici puri e, contemporaneamente, a prendere spunto dai problemi tecnologici o fisici per costruire matematica pura.

Iniziò la sua carriera con alcuni risultati altamente innovativi e fondamentali nel campo che chiamiamo oggi dei “processi stocastici” giungendo all’inizio degli anni Venti a proporre ciò che oggi è conosciuto come “processo di Wiener” [cfr. spec. Wiener 1923]. Una lunga serie di ricerche lo condusse a fissare l’Analisi armonica generalizzata, estensione dell’analisi di Fourier.⁵³ Ebbe anche occasione di interagire, prima a Göttingen e poi negli Stati Uniti, con quei matematici e fisici che negli anni Venti e Trenta erano alle prese con la sistemazione teorica della meccanica quantistica. Lavorò tra gli altri con Max Born e sin da allora molto probabilmente divenne assiduo con John von Neumann. Nei primi anni Trenta, Wiener svolse lavori fondamentali con R.E.A.C. Paley sulle trasformate di Fourier [cfr. Paley e Wiener, 1934].

Queste ricerche si erano sin dai primi anni Venti inanellate con un interesse per il calcolo operativo di Heaviside – il calcolo da cui traggono origine le Trasformate di Fourier e di Laplace – e proprio per portare a forma matematica rigorosa questo calcolo Wiener aveva collaborato con Vannevar Bush praticamente fin dall’ingresso all’MIT, che era avvenuto per entrambi nel 1919.⁵⁴ Wiener diede anche importanti contributi di tipo tecnico. Collaborò al perfezionamento degli analizzatori differenziali, che furono la più importante realizzazione di Bush: in particolare, come già accennato, era partita da lui l’idea del cosiddetto “cinema integrator”, un elemento chiave nello sviluppo degli integratori, su cui lavorarono coloro che avranno il ruolo di maggior spicco nel campo dei servomeccanismi all’MIT, cioè Harold Hazen (uno dei due articoli del 1934 di Hazen è sul Cinema integrator) e Gordon Brown (sia la sua

⁵³ Cfr. Wiener (1930) e non si può non ricordare almeno anche Wiener (1932).

⁵⁴ Inizialmente Wiener (1926) pubblicò un ampio articolo sul calcolo operativo; poi collaborò con Bush alla correzione di capitoli del libro di Bush (1929), che portava in appendice il saggio di Wiener (1929).

tesi di Master che quella di Ph.D. erano dedicate al Cinema integraph) che nel 1940 divenne direttore del neonato Servomechanisms Lab.⁵⁵

Un altro contributo di tipo tecnico a cui Wiener aveva lavorato durante gli anni Trenta riguardava le cosiddette reti di Lee-Wiener. Proprio da questo lavoro scaturì la sua teoria della previsione. Ha affermato il matematico Norman Levinson, uno dei matematici che lavorarono tra l'altro al perfezionamento della teoria matematica emersa dalla ricerca di Wiener sui predittori:

«The mathematical problem of prediction as he [Wiener] formulated it was solvable by a synthesis of his own previous work. He could handled it readily any time after 1931, had he conceived of the problem» [Levinson 1966, p. 26].

La proposta di Wiener

I “predittori” erano dei calcolatori analogici connessi ad un pezzo di artiglieria in maniera da puntarlo con una certo anticipo sull’obiettivo sulla base del percorso compiuto. Nel 1939 il predittore antiaereo più moderno era l’M4 della Sperry Corporation. Si trattava di un calcolatore meccanico, associato un sistema ad input ottico, collegato ad un servomeccanismo azionante un pezzo d’artiglieria. Alcuni addetti seguivano con telescopi il corso dell’aereo nemico azionando manopole ed i dati relativi alla posizione attuale venivano inviati automaticamente ad un calcolatore analogico meccanico che eseguiva una estrapolazione secondo la linea retta, mediante operazioni di derivazione, un metodo conosciuto come “Plan Prediction Method” [cfr. *Appendice II:1*].

Wiener propose la progettazione di un predittore basato su un nuovo metodo di previsione, in grado di effettuare previsioni curvilinee. L’idea fu presentata nel corso di un convegno sui servomeccanismi all’MIT nel novembre 1940, come veniamo informati da uno dei rapporti finali di Wiener e Bigelow:

«D.I.C. Project 5980 originated in a suggestion of Professor Norbert Wiener at a conference on servo-mechanisms in November 1940, to the effect that electrical networks of the type approximating

$$\left(\frac{1 + aiw}{1 + biw} \right)$$

might afford a means of lead evaluation suitable for Predictor use. The idea was discussed with specialists in electrical networks, with representatives of the National Defense Research Committee and others, and also in several memos by Professor Wiener. A test was also made on the M.I.T. Differential Analyzer of several assumed network operators. Developments were encouraging, so that in December 1940 a small appropriation was authorized, establishing D.I.C. Project 5980 to investigate the matter.» [*Summary Report for Demonstration*, p. 1. Cito da Hellman 1981, pp. 146-7]

Il metodo, sul quale entriamo nei dettagli tecnici nell’*Appendice II:2*, utilizzava la teoria degli operatori, che trovava allora applicazioni dell’ingegneria delle comunicazioni ma non nei servomeccanismi, e soprattutto non in contesti meccanici o elettromeccanici. In particolare Wiener pensò di trattare il problema della previsione come un problema - diremmo oggi - di teoria dei segnali, considerando la curva della rotta dell’aereo come il segnale di *input* da immettere in un predittore opportunamente predisposto per fornire come segnale di *output* la rotta futura dell’aereo. Per far ciò occorre trovare dunque una funzione di trasferimento adatta, che però come Wiener aveva chiaro viola il principio di causalità e fa sì che il sistema sia teoricamente irrealizzabile. Egli pensava, però, che fosse possibile approssimare tale

⁵⁵ La tesi di Master è del 1934 e quella di dottorato del 1938. Cfr. Mindell (1996), p. 275, nota 70.

funzione mediante un filtro realizzabile, costituito o da una adatta rete di Lee-Wiener o da un assemblaggio equivalente di integratori.

Una rete di Lee-Wiener è una cascata più o meno lunga di circuiti passivi standard basati sulla teoria delle funzioni di Laguerre. Wiener aveva cominciato a lavorare su questo tema all'MIT nel 1929-'30, insieme al *graduate student* in ingegneria elettrica Yuk-Wing Lee, che Bush stesso gli aveva fatto conoscere. Dopo avere depositato tre brevetti relativi ad esse,⁵⁶ Wiener e Lee avevano ulteriormente sviluppato il metodo alla Qinghua University di Pechino nel 1935-'36 [cfr. Wiener 1958, p. 111].

Occorre aggiungere che il problema antiaereo si poteva suddividere in due sottoproblemi: il tiro di breve e medio raggio, utilizzando mitragliere e cannoncini di piccolo calibro, che richiedeva una previsione di breve periodo; ed il tiro di lungo raggio, diretto verso aerei d'alta quota, utilizzando cannoni di calibro maggiore, che richiedeva una previsione più lunga. Mentre l'M4 era più adatto ad un tiro di medio raggio, la proposta di Wiener si poteva applicare ad entrambi i problemi e sembrava elettiva per il lungo raggio. Come vedremo più avanti l'idea fu sfruttata anche dal servo lab per sistemi di breve e medio raggio, da collocare anche su carri armati per esempio; a Wiener fu lasciato soltanto lo studio sugli aerei d'alta quota.

Wiener racconta di aver discusso della proposta con Caldwell e che, «after the custom of those times, Caldwell immediately put a classification on my ideas, so that thereafter I could no longer speak freely of them to anyone with whom I wished to talk.» [Wiener 1956, p. 241]. Caldwell avviò subito con Wiener una serie di prove, che durarono circa tre settimane, utilizzando l'analizzatore differenziale di Bush per studiare vari assemblaggi [ivi, pp. 241-2]. Dopo questo periodo di prova, il 22 novembre 1940, fu formalizzata una proposta alla Sezione D-2 dell'NDRC.⁵⁷ È interessante notare il linguaggio che si usa nella proposta. Si dice che:

«The proposed project is the design of a lead or prediction apparatus in which, when one member follows the actual track of an airplane, another member anticipates where the airplane is to be after a fixed lapse of time. This is done by a linear network into which information is put by the entire past motion of the airplane and which generates a correction term indicating the amount that the airplane is going to be away from its present position when a shell arrives in its neighborhood. *The principles of design are those of electric networks in general, although the realization may be by mechanical equivalents to electrical networks.*»⁵⁸

Come si vede, da un lato si affaccia un linguaggio informazionistico, dall'altro è evidente come Wiener veda la possibilità che l'idea si potesse applicare a dispositivi sia elettrici che meccanici.

La proposta fu accettata dall'NDRC nel dicembre 1940 come D.I.C. project 5980, per un ammontare iniziale di 2.325 dollari [cfr. Masani e Phillips (1985), p. 143]. Alla fine l'insieme dei progetti condotti da Wiener costò circa 30.000 dollari [cfr. Mindell 2002, p. 282]. Nel gennaio 1941 fu assegnato al progetto anche il giovane ingegnere Julian Himely Bigelow (1913-2003), proveniente dall'IBM.⁵⁹

La nuova ottica introdotta da Wiener

La proposta iniziale di Wiener si fonda su una intuizione, una congettura da verificare. In particolare egli pensa che si possa usare la teoria degli operatori dell'ingegneria delle

⁵⁶ US patents 2.024.900, 2.128.257 e 2.124.599.

⁵⁷ *Caldwell's Proposal to Section D2*, pp. 1-2. Cito da Masani e Phillips (1985), p. 142.

⁵⁸ *Ivi*, p. 143, il corsivo è mio.

⁵⁹ Con una preparazione matematica e ingegneristica, dopo un Master in "Communication Engineering" all'MIT, Bigelow aveva lavorato alla Sperry Corporation, per due anni e mezzo, per poi passare alla IBM Corporation di Endicott. Qui alla fine del 1940 il suo capo dipartimento alla IBM, professor Wildes, gli propose di andare a lavorare con Wiener [cfr. Bigelow 1971].

comunicazioni - diciamo in linguaggio più moderno le tecniche frequentistiche, le funzioni di trasferimento, la teoria dei segnali - in problemi tipici dei servomeccanismi. Ne abbiamo testimonianza in almeno due rapporti di guerra di Wiener, cioè nelle pagine dello *Yellow peril*, che citeremo più avanti, nonché nell'esordio del *Final Report*, del 1° dicembre 1942, dal quale veniamo informati del fatto che la ricerca

«had its inception in certain questions that were put to the author in the fall of 1940 concerning servomechanism design. *At that time the author was very much interested in what has become a routine matter since, namely, the use of the methods of communication engineering in servo design*». [Wiener's *Final report*, p. 1. Il corsivo è mio]

Esiste una testimonianza esterna molto preziosa di questo atteggiamento ed è costituita da un appunto del 9 novembre 1940 di Edward Poitras, il quale – come ci informa Mindell (2002) – scrive sul suo diario ufficiale di aver avuto un incontro all'MIT con Wiener e che questi

«[Wiener] wants to tackle the problem of solving for the controller of servos in terms of the input as the frequency spectrum». Aggiunge che «he believes that considerable of the present network theory could be applied to the servo problem». ⁶⁰

Wiener dunque propone una nuova ottica che permetterà infine di giungere alla sistemazione definitiva oggi conosciuta come Teoria classica dei controlli, di cui abbiamo parlato nel primo capitolo. Tale originalità è stata messa in discussione, però, proprio da Mindell (2002), che ha puntato in particolare il dito su un passo di *I am a Mathematician* (1956), l'autobiografia di Wiener, dove questi non fa che ripetere le cose che aveva detto nei documenti di guerra e che abbiamo visto essere annotate da Poitras. Wiener, nel passo in causa scrive che, intorno al 1940,

«servomechanisms for the control of gun turrets and other pieces of heavy apparatus were naturally assumed to belong to power technique rather than to communication technique. The whole tradition of power technique was to consider electric currents and voltages as varying in time, while the whole tradition of communication technique, particularly under the influence of Heaviside, had led to consideration of a message as a sum of a large or infinite number of different frequencies. It was not easy to see that the frequency treatment, rather than the time treatment, was just as appropriate for the servomechanism as for the telephone, the telegraph, and television.

I think that I can claim credit for pointing this fact out and for transferring the whole theory of the servomechanism bodily to communication engineering». [Wiener 1956, p. 265, il corsivo è mio]. ⁶¹

Nelle frasi citate Wiener non rivendica di aver portato a termine la sintesi teorica in cui consta la Teoria classica dei controlli. Anzi è piuttosto certo che egli abbia saputo degli amplificatori reazionati, dei metodi frequentistici per trattarne la stabilità e dello stesso concetto di *feedback*, in senso non controllistico, solo nel corso della ricerca conversando con Bigelow. ⁶²

La lunga citazione dell'autobiografia indica solo che nel 1940 Wiener conosceva, però, bene le tecniche utilizzate nei servomeccanismi all'MIT, che tradizionalmente si basavano sullo studio della risposta in transitorio – perciò parla dello studio di “correnti e tensioni come variabili nel tempo” – approccio che ancora permane nel saggio di Brown su *Behavior and*

⁶⁰ Edward J. Poitras, “Diary”, 9 novembre 1940, OSRD 7 GP, box 70, *Collected Diaries*, vol. 1. Cito da Mindell (2002, p. 277 e nota 2 p. 383).

⁶¹ Mindell (2002) pensa che in questo passaggio, e in generale per quanto riguarda la ricostruzione delle vicende della Cibernetica, Wiener avrebbe proposto «a classic foundation myth of science and technology», consistente nella credenza che alcuni geni, scienziati e matematici produrrebbero le grandi idee, lasciando poi ad altri, di solito ingegneri, il solo compito di metterle in pratica [cfr. Mindell 2002, tutta l’“Introduction”, pp. 2-17, ma spec. p. 5].

⁶² Vedi più avanti nel testo.

*Design Servomechanism*⁶³ del novembre 1940, fatto circolare come rapporto di guerra, e di come in seguito all'applicazione delle tecniche frequentistiche delle telecomunicazioni ai problemi dei servomeccanismi si fosse giunti ad una teoria dei controlli finalmente solida. Hazen stesso, in una intervista, ha confermato la situazione anteguerra descritta da Wiener asserendo:

«At this time I was not aware of Routh's and Hurwitz's work. I knew vaguely of Nyquist and Bode's frequency domain work at B.T.L. which I mentally associated only with communications network theory. I did not recognize at the time the intimate and fundamental interconnection between this and the transient analysis approach statistico».⁶⁴

Occorre ricordare tra parentesi che, invece Wiener, era al corrente se non del criterio di Routh, sicuramente delle condizioni di stabilità che quel criterio serve a stabilire. Infatti nel 1931 Wiener aveva scritto su una rivista dell'MIT di una conversazione in cui J.B.S. Haldane, nel clima della Grande Depressione, gli aveva confidato che:

«if anyone could persuade him that the equations governing the capitalistic system had *a stable solution, containing no exponentials in the time with exponents with positive real part*, he would vote conservative from then on, but that since he was convinced that there is to prevent economic cycles from becoming progressively more extreme, he was forced to be a socialist» [Wiener 1931, p. 218. Il corsivo è mio]

La frase in corsivo costituisce proprio la condizione di stabilità espressa nell'articolo di Maxwell *On Governors* e della quale poi Routh e Hurwitz avevano proposto metodi per accertarla senza passare per la soluzione delle equazioni differenziali. Il problema non sta comunque nel disquisire su chi sapesse di più in fatto di *feedback* all'MIT. Ciò che Wiener rivendica nel passo citato dell'autobiografia è ciò che fece all'inizio della ricerca sui predittori, cioè l'introduzione di un'*ottica nuova*. Quell'ottica che Hazen ammette francamente di non aver posseduto quando dice di non aver riconosciuto “l'intima e fondamentale interconnessione” tra l'approccio di Nyquist e Bode con i problemi dei servomeccanismi. Come vedremo tra poco, questa connessione non la vedevano nemmeno Nyquist, Bode e gli altri studiosi dei BTL che - parallelamente a Wiener - si occuparono di predittori, e ciò nonostante la loro assiduità con l'approccio frequentistico. Questo accadeva semplicemente perché era difficile vedere che teorie e tecniche legate a telefono e telegrafo, ed in generale alle comunicazioni, potessero essere estese a sistemi meccanici o elettromeccanici, come i servomeccanismi. Wiener invece “vide” questa connessione.

La proposta di Wiener era estremamente innovativa, contointuitiva e se si vuole “folle”. Non a caso Caldwell nella proposta per l'NDRC, dopo il lavoro di prova, aveva scritto:

«Because of the uncertainty of success initially, no effort was made to offer this project for a sponsorship by the National Defense Research Committee. The preliminary results obtained, however, indicate a much higher probability of success, and it is the conclusion of all members of the group who have volunteered their work that a more extensive exploratory program should be initiated. This cannot readily be done on the voluntary basis, because it would disrupt the regular activities of the men involved».⁶⁵

Anche dopo l'accettazione da parte dell'NDRC la proposta mantenne un alto grado di “eccentricità” se è vero che nell'invitarlo a collaborare con Wiener, il capo di Bigelow all'IBM gli avrebbe detto che

⁶³ Brown, “Behavior and Design of Servomechanisms.” OSRD 39, Report to the Services 2, MIT, Novembre 1940. Sul metodo della risposta in transitorio cfr. [Bennett 1993], pp. 138-139. [Mindell 1996], p. 287 cita lo scritto originale del 1940 come “Transient Behavior and Design of Servomechanisms.”

⁶⁴ Hazen, intervistato da Bennett, 22 ottobre 1975. Cito da Mindell (1996, p. 253).

⁶⁵ Caldwell's Proposal to Section D2. Cito da Masani e Phillips (1985, p. 142). Il corsivo è mio.

«nobody at MIT knew whether what Wiener was saying was *sensible or not or feasible or not*, and they were looking for a man with an engineering and mathematical background who would serve as an interpreter and serve as a colleague for Norbert Wiener.» [Bigelow (1971), il corsivo è mio].

Wiener vide strette analogie tra territori di fatti apparentemente distinti e di fatto studiati entro tradizioni di ricerca ben distinte e Gabor – nella citazione posta all’inizio di questo capitolo – fa risalire questa capacità al suo carattere di matematico puro, come d’altro canto sostenuto anche nel già citato passo di Norman Levinson. Wiener stesso in *Invention* insiste sulla capacità che la matematica offre di vedere analogie formali tra territori di fatti apparentemente diversi [Wiener (1954), pp. 47-50]. D’altro canto in questo c’è anche un limite: fino a che punto – è lecito chiedersi – le analogie formali possono condurre ad una unificazione sostanziale di campi diversi? Come è stato opportunamente osservato da Settimo Termini (2006). Si tratta di una questione che resta aperta.

L’obiezione di Mindell si spiega probabilmente con il riaffiorare a livello storiografico di un conflitto tra due culture disciplinari che sono costrette a convivere nella Cibernetica sin dal suo esordio: quella dell’ingegnere e quella dello scienziato puro.

Dall’approccio curvilineo all’approccio statistico

La ricerca di Wiener sui predittori durò poco più di un anno, tra la fine del 1940 e il 1° febbraio 1942, quando cioè venne rilasciato per la diffusione ristretta il libro conosciuto col soprannome di *Yellow peril*, che contiene la teoria matematica ormai ad uno stato di sviluppo avanzatissimo. Il 1942, in un contesto carico di difficoltà esterne, fu dedicato principalmente alla fase di realizzazione del prototipo di predittore ed alla sua sperimentazione.

La rapidità del procedere di Wiener si spiega solo se si tiene conto del fatto che egli era un pensatore vulcanico, tanto che in passato aveva escogitato le note equazioni di Wiener-Hopf nello spazio di una notte e che avrebbe scritto il libro *Cybernetics* in non più di tre mesi, impiegando forse anche meno per lo *Yellow peril*. D’altro canto nella ricerca confluirono gran parte dei suoi precedenti studi. Come scrive in *I am a Mathematician*,

«My war work on filtering and prediction of time series had represented an extension of my earlier work on generalized harmonic analysis and on the Brownian motion as tools for the study of irregular phenomena distributed in time. For years I had the intention of using these tools in every region in which they seemed apt». [Wiener 1956, p. 288]

All’inizio la ricerca consisteva solo nel tentativo di esplorare le possibilità che la metodica proposta offriva per una previsione curvilinea.⁶⁶ I montaggi che Wiener fece con Caldwell sull’analizzatore differenziale contemplarono quattro casi: una traiettoria rettilinea, una con una pendenza doppia della prima, una con un andamento parabolico, ed infine una curva semicircolare.⁶⁷ D’altro canto come si legge nella proposta all’NDRC l’obiettivo prioritario era ancora più ambizioso, consistendo nell’esplorazione delle “the purely mathematical possibilities of prediction by any apparatus whatever”; per poi passare a trovare le funzioni di trasferimento più adatte, le loro approssimazioni polinomiali e costruire poi l’assemblaggio adatto per giungere alla realizzazione di un predittore [cfr. Caldwell, *Proposal to Section D2*, p. 2-3, citata da Masani-Phillips 1985, p. 143].

⁶⁶ Si veda in tal senso quanto scrive Bigelow riassumendo il discorso di Wiener al convegno ai BTL: «to predict non-uniform curvilinear performance of the target». *Bigelow’s Report of conference*. Cito da Bennett (1994, p. 60).

⁶⁷ Cfr. *Caldwell’s Proposal to Section D2 e Wiener’s Principles governing apparatus*. Cit. spec. in Galison (1994, p. 234).

D'altro canto, secondo il suo stile di ricerca tipico, Wiener tendeva sempre ad allargare l'indagine in tutti i suoi possibili aspetti. Come si legge in uno dei rapporti finali:

«From the first of January until the last of February 1941, an exhaustive study of networks as a means of prediction was carried out, both as to theoretical capabilities and practicability in A.A. Director service. Inevitably, this study developed into a complete investigation of the entire A.A. Director problem from a very broad viewpoint.» [*Summary Report for Demonstration*, p. 2. Cit. da Hellman 1981, p. 157]

Perciò molto precocemente la ricerca si allargò ad includere questioni statistiche, tanto che il metodo di previsione proposto da Wiener sarà conosciuto non più come “metodo curvilineo”, ma come “metodo statistico” di previsione. Wiener si era reso conto, probabilmente già nella fase delle prove con Caldwell, che se si sceglieva una approssimazione di grado n alto [cfr. “APPENDICE II:2”], si otteneva una buona previsione nel caso di curve lisce, ad esempio, per un segmento o un tratto di curva sinusoidale; al contrario lo stesso settaggio rendeva estremamente instabile l'intero sistema quando il dispositivo per l'*input* passava da una curva all'altra, vale a dire quando incontrava un punto angoloso. Si consideri che un integratore di Bush aveva per *input* una sorta di pantografo che seguiva una curva e per *output* un plotter dotato di pennino. Dunque durante le prove con Caldwell dobbiamo immaginare che quando l'andamento della curva cambiava bruscamente, il pennino oscillava violentemente. Tale instabilità diminuiva invece se l'ordine di approssimazione era basso, dunque se la previsione era più grossolana.⁶⁸

L'osservazione di questo fenomeno portò Wiener a pensare che esso rispecchiasse una difficoltà intrinseca nel problema in esame. Basandosi su un tipo di considerazione operativistica che è simile a quella che aveva condotto Heisenberg a formulare il Principio di indeterminazione, Wiener, piuttosto che insistere con il cercare un predittore universale perfetto, considerò che si doveva cercare il “migliore” possibile, cioè quello in grado di offrire il miglior compromesso tra errori dovuti ad imprecisione ed errori dovuti ad eccessiva sensibilità in caso di cambiamenti bruschi della traiettoria [cfr. Wiener 1956, p. 244].

Si trattava quindi di un problema statistico e Wiener decise di interpretare l'aggettivo “migliore” nel senso della minimizzazione dell'errore quadratico della previsione [cfr. *ivi*, pp. 244-5]. A questo punto il «problema della previsione», dopo aver fatto alcune assunzioni circa la statistica delle curve da predire, diventava «un problema di minimizzazione», che si poteva trattare con il calcolo delle variazioni e nel caso specifico si perveniva ad una equazione integrale del tipo Wiener-Hopf, che non gli fu difficile trattare analiticamente [cfr. *ivi*, p. 245].

Lo studio degli esseri umani: il pilota e l'artigliere

Un altro fatto che caratterizza la ricerca sin dall'inizio è il tener conto degli elementi umani implicati nel sistema in quanto fonti di irregolarità e disturbo. In particolare questi erano gli artiglieri addetti alla guida dei telescopi, che non potevano evitare di introdurre errori in questa operazione manuale,⁶⁹ nonché il pilota nemico, che poteva attuare attività evasive sebbene entro certi limiti, a causa delle accelerazioni che poteva sopportare, del panico, delle resistenze al cambiamento che comunque l'aereo avrebbe opposto a queste manovre.

Il trattamento dell'elemento umano è facilitato dall'approccio in frequenza. Nel caso del pilota si ragiona sulle frequenze che possono provenire da un volo più o meno regolare; mentre i disturbi introdotti dall'artigliere possono essere considerati come “rumore” da eliminare mediante un'azione di filtraggio, fatto alquanto suggestivo visto che stiamo parlando non di

⁶⁸ Cfr. *Wiener's Final Report*, pp. 1-2; Wiener (1948, p. 9; e 1956, pp. 243-244).

⁶⁹ Cfr. Wiener (1948), pp. 5-6, nonché *Summary Report for Demonstration*, p. 3 come citato da Hellman (1981, p. 160) e *Wiener's Principles governing apparatus*, come citato da Masani e Phillips (1985, p. 151).

“rumore” acustico, ma di manovre meccaniche “a scatti”. Anche il problema del filtraggio del rumore fu trattato mediante un metodo statistico di minimizzazione.

«The concept of predicting the future of a message with a disturbing noise on the basis of the simultaneous statistics of the noise and message turned out to contain in itself the whole idea of a new method for separating noises and messages in what would be in some sense the best possible way». [Wiener 1956, p. 246]

La soluzione del problema richiese un'altra equazione di Wiener-Hopf.

In generale l'approccio statistico rese necessario conoscere le caratteristiche statistiche effettive del comportamento di piloti e artiglieri. In una prima fase, a cui si lavorò per tutto il 1941, si cercò di verificare se le prime assunzioni statistiche fatte fossero realistiche. Come scriverà Wiener:

«In order to obtain as complete a mathematical treatment as possible of the over-all control problem, it is necessary to assimilate the different parts of the system to a single basis, either human or mechanical. Since our understanding of the mechanical elements of gun pointing appeared to us to be far ahead of our psychological understanding, we chose to try to find a mechanical analogue of the gun pointer and the airplane pilot.» [ivi, pp. 251-252.].

In una seconda fase – che doveva essere avviata nel 1942 – lo studio dei componenti umani sarebbe servito a introdurre dei miglioramenti nel sistema definitivo.

Entra in gioco il feedback

Una delle scoperte della coppia Wiener-Bigelow fu che l'operatore si comporta come un servomeccanismo a *feedback*. Scrive Wiener in un rapporto ufficiale:

«We realized that the “randomness” or irregularity of an airplane's path is introduced by the pilot; that in attempting to force his dynamic craft to execute a useful manoeuvre, such as straight-line flight or 180 degree turn, the pilot behaves like a servo-mechanism attempting to overcome the intrinsic lag due to the dynamics of his plane as a physical system, in response to a stimulus which increases in intensity with the degree to which he has failed to accomplish his task. A further factor of importance was that the pilot's kinaesthetic reaction to the motion of the plane is quite different from that which his other senses would normally lead him to expect, so that for precision flying, he must disassociate his kinaesthetic from his visual sense».⁷⁰

Fu considerando soprattutto il comportamento del pilota che Bigelow - dotato di una certa esperienza di pilotaggio e di una buona conoscenza dell'ingegneria delle comunicazioni - suggerì di considerare l'intervento del *feedback*. Secondo la testimonianza di McCulloch: «Norbert told me, and I believe wrote somewhere, that it was Julian who had impressed on him the importance of *feedback* in guidance» [McCulloch 1974, p. 12]. Lo stesso Bigelow ha sostenuto che:

«there's a huge literature on guidance, homing [autoguida] and control problems with which Wiener was not very well acquainted in those days, and I happened to have more familiarity with the area than he did.»⁷¹

La discussione tra Bigelow e Wiener si focalizzò sul comportamento degli operatori umani o altri esseri viventi nell'inseguire una mèta, i quali non eseguono solo una estrapolazione, ma tendono ripetutamente a correggere la loro direzione tenendo conto dell'errore di mira. Scrive Wiener nell'autobiografia:

«In both these cases [pilota e artiglieri], the operators seemed to regulate their conduct by observing the errors committed in a certain pattern of behavior and by opposing these errors by actions deliberately tending to reduce them.» [Wiener 1956, p. 252]

⁷⁰ *Summary Report for Demonstration*, cito da Galison (1994, p. 236).

⁷¹ Riassunto di Hellman (1981, p. 151), sulla base di una sua conversazione con Bigelow del giugno 1981.

Fin qui il *feedback* rientrava nel suo più attendibile significato balistico: come quando si prende la mira sparando su un bersaglio fisso, e la si corregge sulla base della misura dell'errore della prova precedente. Ma il discorso di Bigelow e Wiener divenne subito un po' più complesso. Riferendosi ad una torretta controllata da un servomeccanismo a *feedback*, manovrato manualmente mediante una manopola, Wiener scrive:

«the primary purpose of *feedback* control on the gun turret is to make the response of the turret more nearly proportional to the push on the lever and thus less dependent on the variable friction, the inertia, and other external circumstances.» [ivi, pp. 252-3].

In sostanza l'operatore umano opererebbe mediante un *feedback* negativo in maniera da rendere più governabile l'apparato, essendo con un *feedback* negativo più indipendente dalle circostanze contingenti. Essi pensarono in sostanza allo stesso fenomeno che si osserva nell'amplificatore reazionato studiato da Black. L'ottica complessiva da cui Wiener è guidato è sempre quella di descrivere il comportamento degli operatori come fonti di irregolarità nel sistema (nell'aereo o nel predittore), perciò la questione principale è quella di *feedback* che garantiscano manovre uniformi e che compensino eventuali disturbi. Wiener annota anche che in caso di un *feedback* eccessivo l'apparato entra in oscillazione spontanea ed invece di compensare diventa fonte di ulteriore instabilità.

L'esperimento per simulare le difficoltà degli operatori umani

Nel luglio 1941 al gruppo Wiener-Bigelow si aggiunse Paul Mooney, un abile tecnico, e si creò un piccolo laboratorio. Fu preparato un esperimento per generare funzioni irregolari e un apparato di previsione sulla base delle osservazioni statistiche emerse dall'esperimento [cfr. *ivi*, pp. 248-250].

L'esperimento utilizzava due apparati distinti: un primo sistema controllava un faretto che proiettava sul soffitto un punto luminoso, generando curve irregolari con un grado di irregolarità statisticamente controllabile; un secondo dispositivo era dotato di un altro faretto, azionato da una manopola, con il quale si doveva cercare di seguire il primo punto luminoso.

Il secondo dispositivo, progettato da Bigelow, serviva ad offrire la "sensazione" del controllo reale di un aereo, simulando cosa accade ad un pilota che cerca di eseguire una manovra per sfuggire alla contraerea. Questo dispositivo era costruito per disorientare il manovratore, in quanto il movimento del faretto che con esso veniva diretto non seguiva in maniera proporzionale quello della manopola, e doveva offrire così sensazioni cinestetiche diverse da quelle che il manovratore si sarebbe aspettato; in pratica la manopola doveva essere sentita come difettosa.⁷²

L'esperimento ebbe come risultato che non c'era una correlazione significativa tra le fluttuazioni dei diversi operatori, ma che c'era alta autocorrelazione tra il comportamento di un operatore col suo stesso passato. Dunque ogni operatore tendeva a comportarsi in una maniera peculiare. Il dispositivo in questo senso «threw a great deal of light on the way in which we act when we are confronted with an artificial problem and on the nature of humanly caused irregular action» [Wiener 1956, pp. 250-1].

Il colloquio con Rosenblueth

In questa prospettiva si comprende meglio il colloquio che, insieme a Bigelow, Wiener ebbe con il suo vecchio amico Arturo Rosenblueth, neurofisiologo della Harvard Medical School. Wiener chiese ufficialmente a Weaver di poter conversare con Rosenblueth solo nel luglio 1942. Tuttavia c'erano state certamente conversazioni precedenti, perché sappiamo che le idee

⁷² Cfr. *Stibitz's Report on Visit*, citato da Galison (1994, pp. 226-7).

contenute nell'articolo "Behavior, Purpose and Teleology" (1943), in cui rifluirono quelle conversazioni «were disseminated by Dr. Rosenblueth at a meeting held in New York in 1942, under the auspices of the Josiah Macy Foundation» [Wiener 1948, p. 12], un seminario sulla «cerebral inhibition», cioè sull'ipnosi, che si era tenuto, nei giorni 13-15 maggio.⁷³

L'incontro tra Wiener, Bigelow e Rosenblueth di cui ci parlano vari testi posteriori di Wiener si svolse dunque certamente prima del maggio 1942 e forse addirittura nell'ambito dell'interpretazione dell'esperimento con i faretti. Wiener voleva avere una conferma dell'ipotesi secondo cui nel comportamento dell'operatore umano era implicato un *feedback* che ne migliorava le performance. Applicando la massima della fisiologia secondo cui «the pathology of an organ throws a very great light on its normal behavior» [Wiener 1956, p. 252], egli cercò di sapere se vi fosse una patologia che potesse essere l'analogo del difetto che affliggeva da sempre i sistemi di controllo quando divenivano instabili, cioè il "pendolamento" o *hunting* dei sistemi di controllo meccanici [cfr. Wiener 1948, p. 7]. La domanda rivolta a Rosenblueth fu formulata più o meno così:

«Are there any known nervous disorders in which the patient shows no tremor at rest, but in which the attempt to perform such an act as picking up a glass of water makes him swing wider and wider until the performance is frustrated, and (for example) the water is spilled?» [Wiener 1956, p. 253].⁷⁴

La risposta di Rosenblueth ebbe per Wiener il sapore della riuscita di un esperimento cruciale. Tali condizioni patologiche, rispose Rosenblueth, esistevano, erano conosciute come tremori di mèta [*intention tremors*] ed erano associati a disfunzioni del cervelletto, organo che controlla sia l'organizzazione che l'intensità dell'attività muscolare [cfr. *ivi*, pp. 253-4].

Perciò il sistema che Wiener e Bigelow stavano approntando aveva a che fare con componenti umani, che potevano essere considerati come dei dispositivi sottoposti a *feedback* e che consentivano loro di avere un comportamento uniforme, anche se solo entro certi limiti.

In generale tutto l'apparato di controllo antiaereo poteva essere considerato come un *feedback loop*, a sua volta costituito al suo interno da tanti altri componenti, compresi gli operatori umani, muniti di *feedback loops* aggiuntivi. Seguendo queste indicazioni, nella prima metà del 1942, venne costruito un predittore grezzo e dal comportamento poco verificabile in quanto non erano disponibili dati reali, non solo quelli più fini che si sarebbero dovuti misurare studiando gli operatori umani, ma anche quelli disponibili circa le *performance* effettive degli aerei [cfr. *ivi*, pp. 254-5].

Il Convegno ai Bell Laboratories del 4 giugno 1941

Prima di esaminare le vicende della ricerca di Wiener nel corso del 1942 ed entrare nel merito del contenuto dello *Yellow peril* per quel che riguarda gli sviluppi della Cibernetica, è opportuno fare un piccolo passo indietro e discutere di due convegni svoltisi tra il maggio e il giugno del 1941. Essi sono interessanti per rispondere all'interrogativo riguardante il ruolo svolto dalla ricerca di Wiener e comprendere come essa interagì con le altre ricerche allora attive sul problema della previsione.

Il 4 giugno 1941 si tenne un Convegno con gli studiosi dei BTL del progetto per il predittore M-9. Qui Wiener e Bigelow incontrarono H. W. Bode, R. B. Blackman, C. A. Lovell, E.C.

⁷³ Ha dichiarato Gregory Bateson molti anni dopo: «"Cerebral inhibition" was a respectable word for hypnosis. Most of what was said about "*feedback*" was said over lunch». [Mead e Bateson 1976].

⁷⁴ Cfr. anche il resoconto di Wiener (1949, p. 8).

Wente, nonché con Claude E. Shannon, che era stato chiamato per la sua esperienza sugli analizzatori differenziali. [cfr. Shannon 1941]⁷⁵

Il progetto per l'M-9 era stato formalizzato nel novembre 1940 dall'NDRC con i BTL, con un contratto dell'ammontare di 1.273.000 dollari [cfr. Mindell 1995b, p. 93]. Vi erano inizialmente coinvolti il fisico D. B. Parkinson, che aveva avuto la prima idea, C. A. Lovell e Mervin Kelley. Il progetto era stato subito approvato da Frank Jewett, cioè – lo ricordiamo – il fondatore e presidente dei BTL, nonché membro del gruppo ristretto dell'NDRC. Esso era stato anche immediatamente caldeggiato da quella parte dell'Esercito che si occupava delle telecomunicazioni, che costituivano il *core-business* dell'AT&T-Western Electric,⁷⁶ la società cioè che controllava i BTL e che si assicurò la commessa per la produzione in serie dell'M-9,⁷⁷ omologato come predittore T-10 dello US Army per la guida remota di un cannone antiaereo da 90 mm a controllo idraulico. Come emerse conclusivamente dalla dimostrazione del 6 dicembre 1941 a Fort Monroe, cui fu sottoposto il prototipo del T-10, il predittore aveva performance uguali se non peggiori ai predittori meccanici della Sperry. Fu comunque mandato in produzione.⁷⁸

A differenza del progetto di Wiener, la ricerca sull'M-9 era perciò inserita fin dall'inizio in un programma industriale di grande ampiezza. Perché ciò non fosse avvenuto anche per il progetto di Wiener non è dato saperlo. Non sembra che sia stata però una decisione di Wiener, ma delle due istituzioni da cui egli dipendeva in quel contesto, cioè la Sezione D-2 e l'MIT. Comunque questa differenza spiega perché agli scienziati dei BTL fu possibile fin dall'autunno 1940 avere accesso a tutte le informazioni disponibili sui predittori: quelle dei militari sui problemi della contraerea e sul comportamento degli aerei e quelle industriali circa gli ultimi sviluppi dei predittori della Sperry. Lovell visitò anche le scuole di addestramento di artiglieri antiaerei e arsenali, verificando i dispositivi disponibili: telescopi, trasmettitori e ricevitori di dati.⁷⁹ Ricevette, per esempio, dal Frankford Arsenal i progetti dei meccanismi di rilevamento dell'M4 e di altri predittori.⁸⁰ Poitras dell'NDRC inviò a Parkinson e Lovell copie del saggio secretato di Gordon Brown sui servomeccanismi “Behavior and Design of Servomechanisms.”⁸¹ Wiener e Bigelow, al contrario, cominciarono ad avere accesso a dati effettivi solo nel settembre 1942 e per di più in una modalità semi-autorizzata.

L'M-9 era stato concepito come la trasposizione elettrica dell'M-4 meccanico della Sperry.⁸² Esso utilizzava all'inizio dei telescopi guidati manualmente a cui in seguito fu aggiunto un radar *rangefinder* dei BTL, e successivamente un radar in grado di indicare la posizione dell'obiettivo, creato dal Radiation Lab, e omologato nell'aprile 1942 come SCR-584 dello US

⁷⁵ In seguito Shannon applicherà nel progetto la sua teoria algebrica dei relè per l'analisi e la sintesi dei circuiti elettrici implicati nell'apparato [Segal 2003], p. 98, [Mindell 1996], p. 467, [MINDELL 2002], pp. 318-320.

⁷⁶ Cfr. la lettera del 5 settembre 1940 del colonnello Roger Colton, Chief Signal Officer citata da Mindell (1995c), p. 74. E la lettera di Warren Weaver a Fletcher, 31 ottobre 1941, OSRD7 GP, Project #2, citata da Mindell (1995c), p. 76.

⁷⁷ Il contratto con l'NDRC fu siglato il 6 novembre 1940. Mindell rimanda ad una lettera di Weaver a Kelley del 9 Novembre 1940, ma anche ad un «Agreement between NDRC and Bell Telephone Laboratories» datato 19 maggio 1941. Cfr. Mindell (1995c, p. 74 e nota 12 p. 80).

⁷⁸ Lettera di Kelley a Weaver, 17 Dicembre 1941. OSRD7 GP, Project #2. Citata da Mindell (1995c, p. 76).

⁷⁹ Lettera di Lovell a Ordnance Dept., 15 gennaio 1941. Project file 23140, ATT. Citata da Mindell (1995, p. 74).

⁸⁰ Lovell “diary,” 21 Dicembre 1940. Project file 23140, AT&T. Citato da Mindell (1995, p. 74).

⁸¹ Lettera di Poitras a Parkinson, 27 novembre 1940. Project file 23140, AT&T. Gordon S. Brown, “Behavior and Design of Servomechanisms” cfr. Bennett (1993, pp. 138-140); C.A. Lovell “Diary,” 21 Dicembre 1940. Project file 23140, AT&T. citato da Mindell (1995, p. 75).

⁸² Asseriva Warren Weaver: «It seemed sensible to construct a predictor which would be a rather close electrical counterpart of the [Sperry] mechanical predictor which was the army's then standard for heavy AA. In this way one would get the most direct and easily interpretable comparison between the mechanical and electrical ways of going at the problem.» [Warren Weaver, Foreword to “Final Report: D-2 Project #2, Study of Errors in T-10 Gun Director,” OSRD7 Office Files of Warren Weaver, 3. In Mindell (1995c), p. 75].

Army.⁸³ La previsione consisteva in una estrapolazione lineare della rotta dell'obiettivo da abbattere, eseguita mediante il "Plan Prediction Method" dell'M4, implementata però mediante una tecnologia elettrica. Fin dall'inizio emersero grossi problemi, che dipendevano a ben vedere proprio dal fatto stesso che la tecnologia meccanica era stata tradotta in quella elettrica, per così dire, alla lettera. Esso risentiva pesantemente, più del suo analogo meccanico, degli errori nei dati di ingresso introdotti dalle manovre a scatti degli operatori nell'azionare le manopole per manovrare i telescopi: ne derivavano eccessive fluttuazioni nei tassi che servivano alla previsione. Quando fu aggiunto il radar *rangefinder*, la situazione peggiorò ulteriormente a causa del rumore del segnale elettrico. Altri problemi di distorsione dipendevano dagli amplificatori a corrente continua che servivano per le operazioni di derivazione e che causavano un disturbo conosciuto come "drift", nonché dal procedimento di conversione da coordinate polari a coordinate cartesiane ed ancora di riconversione a coordinate polari, su cui si basava il "Plan Prediction Method" dell'M4.

Ironia della sorte, la mole di informazioni messe a loro disposizioni non era stata di particolare aiuto agli studiosi dei BTL, come si evince dalla presentazione che Bode fece del progetto al Convegno. Egli spiegò che il progetto era

«based upon the fundamental urgency of the situation and consequently had intentionally been restricted to functions that could be accomplished by means of apparatus and tools already available. No account was taken of changes in course performance or curvature, and hence no statistical approach was necessary; the apparatus was a purely trigonometric based upon approach».⁸⁴

Nel caso del progetto di Wiener e Bigelow, invece, conoscere le caratteristiche effettive di tutti i componenti meccanici e umani del sistema era vitale per via dell'approccio statistico scelto. Ciò emerge chiaramente anche dalla presentazione di Wiener, in cui spiegò che il loro sistema mirava a

«to predict non-uniform curvilinear performance of the target. [...] [This] involved a knowledge of the probable performance of the target during the time of shell flight and that his method proposed to evaluate this probable performance from a statistical correlation of the past performance of the plane. This involves a statistical analysis of the correlation between the past performance of a function of time, and its present and future performance. Such a statistical analysis is important in the study of time series, and also in applications to the design of impulse filter networks intended to produce the maximum distinction between a given signal and an accompanying random disturbing noise.»⁸⁵

Gli studiosi dei BTL – scriverà Wiener – «more than eager to exchange ideas with us.» [Wiener 1956, p. 249]. Non a caso durante la discussione Blackman fece delle domande evidentemente sollecitate dai problemi tecnici che in cui il progetto era impigliato. Riferì di informazioni spurie che emergevano dalla manovra delle manopole, che influenzavano il calcolo e dunque la previsione, e di una grande amplificazione parassita in relazione a determinate frequenze.⁸⁶

Sebbene studiosi come Blackman e Bode fossero esperti nel trattamento in frequenza, avevano difficoltà ad estenderlo al "filtraggio" delle manovre sottoposte a "scatti" da parte degli operatori, cioè al nesso uomo-macchina. I consigli di Wiener servirono al miglioramento dell'M-9, come hanno sostenuto Wildes e Lindgren, sia per affrontare il problema degli errori umani, che per introdurre il metodo dello *smoothing* (perequazione dei dati) [cfr. Wildes e Lindgren, pp. 186-7]. Wiener spiegò come ridurre gli errori di immissione mediante filtri, e

⁸³ Sulla realizzazione dell'SCR-584 vedi Thompson *et al.* (1957); Getting (1989) e Guerlac (1987).

⁸⁴ Bode nel resoconto del *Bigelow's Report of conference*, cito da Hagemeyer (1979, p. 243).

⁸⁵ Wiener nel resoconto del *Bigelow's Report of conference*. Cito Bennett (1994, p. 60).

⁸⁶ Blackman nel resoconto del *Bigelow's Report of conference*. Cito Bennett (1994, p. 59).

come vi fosse da tener conto dell'interdipendenza tra ampiezza e fase, il che consigliava di evitare distorsioni delle caratteristiche di ampiezza per cercare di ottenere migliori caratteristiche di fase. Infine giunse a conclusioni che rivelano quanto ormai avesse meditato l'intera questione. Infatti spiegò che l'oggetto osservato avrebbe potuto avere in linea ipotetica anche frequenze sempre eccessivamente amplificate dal meccanismo di anticipo, tanto che la previsione non sarebbe stata nemmeno possibile. Essa era possibile solo qualora esse fossero occorse raramente, solo in concomitanza con le manovre diversive del pilota. Allora il problema poteva essere superato usando un dispositivo che disconnettesse l'apparato di previsione nel caso in cui la frequenza avesse ecceduto un livello prestabilito.⁸⁷

In seguito gli studiosi dei BTL introdussero diversi correttivi al loro sistema, che comunque divenne veramente efficace solo quando fu sostituito da un metodo di previsione completamente nuovo: il "Memory-Point Method".

Il Convegno del maggio 1941 a Fort Monroe

Un altro convegno, meno tecnico, si era tenuto all'inizio di maggio del 1941 a Fort Monroe,⁸⁸ aperto ad un pubblico di civili e militari. Ne siamo informati da una lettera del 13 maggio 1941 del rettore dell'MIT Karl T. Compton, il quale scriveva a Warren Weaver:

«Norbert Wiener is much disturbed over the instructions given him not to discuss his work on the gun-laying project with the others working in this field who were at the Fortress Monroe conference. He feels that discussion with several of the men, notably Lovell,⁸⁹ and also with Stewart,⁹⁰ would be decidedly valuable to all concerned. He says that it is evident that Lovell has instrumental methods of accomplishing some of the operations which would be desirable in the best embodiment of his mathematical analysis and which he had not known were available. He also believes that some aspects of his analysis can be decidedly helpful in steering future development of the practical equipment».⁹¹

La lettera evidenzia l'insofferenza di Wiener nei confronti delle limitazioni impostegli dalla segretezza. Limiti che, evidentemente, egli doveva aver in quel caso oltrepassato. A Wiener non interessava salvaguardare i propri diritti circa eventuali brevetti, a cui molto probabilmente lì per lì nemmeno pensava, ma considerava l'attività di ricerca intrapresa in un'ottica di massimizzazione degli sforzi per sconfiggere il nemico. Comunque, nella lettera Compton aggiungeva di aver spiegato a Wiener che quel limite gli era stato imposto non per paura che potesse far trapelare qualcosa («spill some valuable beans»), ma per timore che le sue argomentazioni «highly mathematical» «might well have prevented the close get-together of the military and civilian personnel which was a primarily objective of this conference».⁹² Molto probabilmente il convegno del 4 giugno ai Bell Laboratories fu dunque una risposta alla protesta di Wiener.

Questa lettera è importante anche per un altro aspetto. Essa infatti permette di chiarire una questione aperta da David Mindell - che ha trovato anche un certo consenso - secondo il quale un promemoria di Harold Hazen per Weaver, su "The Human Being as a Fundamental Link in

⁸⁷ Wiener nel resoconto del *Bigelow's Report of conference*. Citato da Bennett (1994, p. 59).

⁸⁸ Racconta Wiener: «we travelled South two or three times to Fort Monroe, in Virginia». [Wiener 1956, p. 249].

⁸⁹ C. A. Lovell dei BTL.

⁹⁰ Duncan J. Stewart, manager della Divisione Elettrica della Barber Coleman Company dal 1932-1943, poi vicepresidente e general manager dal 1943 in poi. Cfr. www.engr.wisc.edu. Diverrà capo della Sezione 7.1 della Divisione 7.

⁹¹ Lettera di K. T. Compton a Weaver, NDRC, Defence Department Documents, cito da Masani (1990, p. 192).

⁹² *Ivi*.

Automatic Control Systems”⁹³, avrebbe permesso alla Sezione D-2 di mettere all’ordine del giorno la questione del rapporto uomo-macchina, ed avrebbe anche influito sulla formulazione delle idee stesse cibernetiche precorrendo Wiener.⁹⁴ Ora, il promemoria di Hazen porta la data del 13 maggio 1941, cioè lo stesso giorno della lettera di Compton, e fa seguito anch’esso ad un evento collettivo svoltosi a Fort Monroe, che ha tutta l’aria di essere lo stesso “Convegno di Fort Monroe” a cui si riferisce la lettera di Compton [cfr. Bennett 1993, p. 167].

Parlando di due studiosi come Hazen e Wiener che lavoravano da anni insieme all’MIT, mi sembra temerario fissare in maniera definitiva una questione di priorità, tuttavia il promemoria di Hazen appare a tutti gli effetti scritto dopo aver ascoltato Wiener che parlava del proprio progetto. Dunque il rapporto causale posto da Mindell semmai va invertito. A Fort Monroe, si legge nel promemoria di Hazen, questi aveva colto il ruolo cruciale degli operatori umani che, nell’agire come mezzi di trasmissione dei dati tra i diversi stadi del sistema, costituiscono le maggiori fonti di «*irregularity and inaccuracy of the final result*» [Hazen, *The Human Being*, cito da Bennett 1993, p. 167]. Come si ricorderà queste considerazioni circa l’«*irregularity and inaccuracy*» degli operatori erano già nella proposta di Wiener del novembre 1940.

L’impressione che Hazen si riferisca alle ricerche di Wiener è accresciuta dal fatto che Hazen lodava la qualità del lavoro che si stava facendo nello studiare il comportamento dell’essere umano, anche se pensava che il confronto delle *performance* dei diversi operatori fosse a suo parere meno necessario di una valutazione di come si raccordavano tra loro le dinamiche dei dispositivi artificiali con quelle umane. Sappiamo che, né il progetto dei BTL, né evidentemente le ricerche del Servo Lab, di cui Hazen in quel momento aveva la reggenza, trattavano delle *performance* degli operatori nei predittori. Solo il gruppo Wiener-Bigelow lo stava facendo.

Un altro elemento che discende dal modo di pensare di Wiener era l’idea del limite imposto al sistema da parte dell’operatore umano. Parlando del ruolo dell’artigliere, Wiener dice che questi, nell’inseguire l’obiettivo, «uses a technique in which he cannot follow his target perfectly but in which he introduces certain random errors because of the limitations of his sense organs and muscles» [Wiener 1956, p. 251]. È proprio quel che riferisce Hazen di aver appreso a Fort Monroe, quando parla di «a definite boundary on the performance of any given automatic control system in which a human link is used», «beyond which it is futile to attempt to go».⁹⁵ Inoltre Hazen afferra ora bene il ruolo della risposta in frequenza delle reazioni umane, da studiare entro i «ranges of variation among individuals and for a given individual their variation with the various factors that influence human behavior».⁹⁶ Scriveva ancora nel promemoria:

«the idea struck me more and more forcefully that we should know as much as possible of the dynamic characteristics of the human being as a servo and therefore his effect on the dynamic performance of the entire control system».⁹⁷

⁹³ Hazen, *The Human Being*, 13 maggio 1941, OSRD 7 Office file of Warren Weaver MIT General Folder, box 70. Stralci sono citati da Bennett (1993, pp. 167-8); Mindell (1996, p. 441); Mindell (2002, p. 276 e nota 1 p. 383).

⁹⁴ Scrive Mindell: «To address these questions, in response to Hazen’s memo the NDRC’s fire control section initiated a research program in human-machine interaction, focused on the problems of anti-aircraft fire control. Not only did this work take an approach that would later be called “cybernetic” but it also influenced Wiener’s formulation of his own ideas» [Mindell 2002, p. 276]. Anche Lily Kay, autrice purtroppo prematuramente scomparsa nel 2000, la quale ha dato importanti contributi alla storia della Cibernetica, ha sostenuto che la tesi di *Ph.D.* di Mindell [cfr. Mindell 1996, spec. Cap. 9], dove si anticipavano queste idee, sarebbe convincente nel mostrare molti antecedenti tecnologici e teorici della Cibernetica [Cfr. Kay 2000, note 20 e 23 p. 348].

⁹⁵ Hazen’s *The Human Being*, cito da Bennett (1993, p. 167).

⁹⁶ *Ivi*, cito da Mindell (1996, p. 441).

⁹⁷ *Ivi*.

Hazen escludeva però il punto di vista statistico e non pensava che fosse importante il confronto tra *performance*, ma si rendeva conto dell'importanza di una trattazione integrata dei componenti umani in quanto servomeccanismi alla stregua di altri servomeccanismi meccanici. Aggiungeva:

«it becomes possible to design an entire automatic control system involving human links rationally»,⁹⁸ «as we have found we must include all the dynamic characteristics of component parts in the successful design of mechanical automatic control systems».⁹⁹ E prospettava uno studio dei «fundamental mechanical parameters of the human operator».¹⁰⁰

Hazen discusse di ciò, molto probabilmente dopo il convegno, anche con lo psicologo Samuel L. Fernberger, che qualche giorno dopo gli suggeriva la possibilità di studiare in laboratorio la stabilità emotiva, il comportamento di gruppo degli operatori e gli effetti dello stress da battaglia sul controllo umano.¹⁰¹ In seguito all'interno della Divisione 7, cioè la ristrutturata Sezione D-2 nel quadro dell'OSDR, diretta da Hazen, troveremo Fernberger che si occuperà di un programma per lo studio delle interazioni uomo-macchina.

L'episodio rivela in generale diverse cose. In primo luogo, se le cose sono andate come sembra, evidenzia l'alto grado di confinamento delle informazioni di cui soffrivano anche due colleghi dell'MIT come Wiener e Hazen all'interno dell'organizzazione piramidale dell'NDRC, e dimostra come fosse giustificata la protesta di Wiener a Compton circa la mancanza di comunicazione. In secondo luogo, esso sembra corroborare il discorso che siamo andati sostenendo dall'inizio circa quanto sia stata importante l'azione di Wiener nell'offrire una nuova luce sotto cui vedere le cose di sempre, la sua capacità di essere un catalizzatore. Infine, l'episodio rivela anche la facilità con cui l'approccio che, giustamente Mindell coglie come "cibernetico", aveva di prender piede. D'altro canto il modo in cui Hazen tende ad interpretare questo nascente spirito cibernetico, è volto a fini primariamente applicativi più che conoscitivi come nel caso di Wiener. Inoltre esso tende ad essere ingabbiato nelle nuove strutture organizzative del tempo di guerra.

Verso una conclusione anticipata

Il 1° ottobre 1941 Warren Weaver osservava che la ricerca di Wiener

«probably represents about the ultimate that could be accomplished in designing a predicting system which will take into account all ordinary geometric and dynamic factors, will do the best possible job in filtering out errors, and will take proper account of any statistical trends which may exist in aerial tactics and/or in the habits of aviators».¹⁰²

Si tratta di una testimonianza importante, che dimostra non solo l'apprezzamento del lavoro svolto, ma che permette di essere piuttosto certi del fatto che tutti gli sviluppi che siamo andati finora discutendo erano emersi entro quella data. D'altro canto almeno gli aspetti matematici, sia sulla previsione che sul filtraggio, furono presentati in forma sistematica già nel libro del 1° febbraio 1942, presto ribattezzato come *Yellow peril* [Wiener 1949].

Forse anche una frase di Vannevar Bush al presidente Roosevelt nel *Report for the First Year*, documento aggiornato al 28 giugno 1941, potrebbe celare un riferimento al lavoro di Wiener, quando si dice che con l'aiuto di eminenti scienziati, prevalentemente all'MIT, «In

⁹⁸ Hazen's *The Human Being*, cito da Bennett (1993, pp. 167-8).

⁹⁹ *Ivi*.

¹⁰⁰ Hazen's *The Human Being*, cito da Mindell (1996, p. 441).

¹⁰¹ Cfr. lettera di Samuel L. Fernberger a Hazen, 27 maggio 1941, OSRD 7 GF, box 70. Citata da Mindell (1996, p. 441).

¹⁰² Weaver, *Summary of Project #6*, Section D-2 NDRC, 1° ottobre 1941, OSRD, E-151, AMP, General Records, box 24. Cito da Mindell (1996, p. 436).

nine months a new art has been advanced to a degree which would ordinarily have taken years» [*Bush's Report for the First Year*, p. 8].

L'epilogo della ricerca

Esamineremo con qualche dettaglio in più lo *Yellow peril* nel prossimo capitolo in quanto esso rappresenta a mio parere, forse ancora più dell'articolo *Behavior Purpose and Teleology*, la prima completa espressione della Cibernetica.

Dopo la consegna dello *Yellow Peril*, che l'anonimo estensore della lettera di presentazione del *Final report* definirà un promemoria dove l'autore aveva «applied powerful analytical tools to develop a statistical method of predicting» [*Report to the services no. 59*], si ha in ogni caso l'impressione che Wiener si sia trovato come a dover marciare contro corrente.

Il contratto iniziale di Wiener prevedeva non solo uno studio generale sulla previsione, ma anche la realizzazione di un predittore vero e proprio, e Wiener non aveva nessuna intenzione di non rispettare questa tabella di marcia. Dal febbraio 1942, Wiener, Bigelow e Mooney lavorarono ad un prototipo “grezzo” di predittore da sottoporre a prova. Tuttavia sembrava – senza che ciò fosse mai stato esplicitato fino in fondo dai suoi superiori – che si volesse che Wiener dopo avere ormai completato la teoria matematica generale, si fermasse. Si facevano pressioni su Bigelow perché si desistesse dall'impresa¹⁰³ e si lasciò il gruppo senza istruzioni.

George Stibitz, un fisico matematico dei BTL, del reparto diretto da Fry, nell'ottobre del 1941 era subentrato a Caldwell come supervisore per conto della Sezione D-2. Esprime incessanti dubbi di carattere tecnico sui metodi statistici adottati.¹⁰⁴

In un modo o nell'altro si giunse alla dimostrazione del prototipo, che avvenne il 1° luglio 1942 all'MIT alla presenza dei membri della D-2 al completo: Weaver, Poitras, Fry e Stibitz, i quali restarono meravigliati dell'efficienza dimostrata dal sistema. Riportata alla scala ordinaria, la previsione del dispositivo di Wiener e Bigelow prevedeva con un'ottima approssimazione la posizione dell'obiettivo con un anticipo di 20 secondi sulla base della registrazione della rotta dell'aereo negli ultimi 10 secondi.¹⁰⁵ Stibitz annotò sul suo diario ufficiale:

«Most of the day is spent with Wiener, Bigelow, and Mooney. It simply must be agreed that, taking into account the character of the input data, their statistical predictor accomplishes miracles. Whether this is a useful miracle or a useless miracle, W[arren] W[eaver] is not yet convinced. The fact that predictions can at present be made only for a maximum of 2 seconds is a very serious limitation. [...] For a 1-second lead the behavior of their instrument is positively uncanny. W[arren] W[eaver] threatens to bring along a hack saw on the next visit and cut through the legs of the table to see if they do not have some hidden wires somewhere».¹⁰⁶

Weaver appuntò effettivamente sul suo diario che pensava si trattasse solo di un “miracle” che riteneva completamente misterioso. Il problema, per lui, era ora di stabilire se si trattasse di “un miracolo utile?” [Weaver “Diary”, 1° luglio 1942, NARS, cito da Bennett (1994), pp. 60-1]. Sembrava quasi che il risultato fosse troppo buono rispetto a ciò che si voleva.

Dopo una dimostrazione così buona e convinto dai riscontri coi fisiologi che il sistema fosse fondato su basi teoriche altrettanto buone, Wiener voleva passare dal predittore grezzo ad uno

¹⁰³ Cfr. l'incontro tra Bigelow e Weaver del 10 novembre 1942, dove Weaver ribadisce che il metodo di predizione di Wiener non era adatto per applicazioni pratiche a quel tempo. Warren Weaver, “Diary”, 10 novembre 1942. General Correspondence, Office Files of Warren Weaver, OSRD, (NARA), Record Group 227. Citato da Bennett (1994, p. 61 e nota 19).

¹⁰⁴ Cfr. *Stibitz's Note on Predicting Networks*, febbraio 1942. Citata da Bennett (1994), pp. 60-1 e nota 12; cfr. George R. Stibitz, “Diary”, 21 maggio 1942 (NARA), Bennett (1994, p. 60).

¹⁰⁵ Cfr. G. R. Stibitz, “Diary” 1° luglio 1942 (NARA), citato da Bennett (1994), pp. 60-1 e nota 14.

¹⁰⁶ G. R. Stibitz, “Diary”, 1° luglio 1942 (NARA). Cito da Galison (1994, p. 243).

che contenesse dati reali. «Accordingly – egli ricorderà – we then felt justified in proceeding from our crude experimental setup direction of the design of a complete apparatus for the antiaircraft control and prediction.» [Wiener 1956, p. 254].

Data la natura statistica del progetto, la fase dello sviluppo vera e propria avrebbe richiesto una adeguata conoscenza delle caratteristiche reali dei *feedback loop* interessati. Ma non vi si arrivò mai. Piuttosto inspiegabilmente Wiener venne lasciato senza ulteriori istruzioni. Il 19 luglio 1942 Wiener scriveva a Weaver di star aspettando «vegetating here, chopping wood, walking n miles a day, and haunting the RFD box in the hope of further orders from D2» [Wiener a Weaver, 19 luglio 1942. Cito da Bennett 1993, nota 28 p. 183].

Il 22 luglio 1942 Weaver gli rispose in maniera piuttosto sibillina: riteneva che il lavoro teorico fosse ormai stato completato con successo e che avrebbe trovato larghe applicazioni. Restava secondo Weaver solo la domanda se la teoria potesse essere applicata allo specifico problema dei predittori antiaerei.

Wiener e Bigelow continuarono per la loro strada. Presentarono una proposta datata 31 luglio 1942 alla sezione D-2 in cui chiedevano di poter raccogliere dati realistici sugli errori di rilevamento e di altro tipo, dopodiché iniziarono un largo giro di consultazioni. Sembra che almeno in un primo tempo essi non avessero avuto alcun benestare. Il 1° settembre 1942, Weaver appunta nel proprio diario con linguaggio piuttosto irriguardoso che

«[Wiener and Bigelow] have gaily started out on a series of visits to military establishments, without itinerary, without any authorizations, and without any knowledge as to whether the people they want to see (in case they know whom they want to see) are or are not available. W[arren] W[eaver] is highly skeptical about this whole business. [...] Inside of twenty four hours my office begins to receive telegrams wanting to know where these two infants are. This item should be filed under “innocents abroad” [ingenui a zonzo]». ¹⁰⁷

In un modo o nell'altro si aprirono a Wiener e Bigelow le porte di numerosi centri di ricerca: a Princeton e al Tufts College ottennero informazioni circa gli errori nelle procedure di rilevamento; al Langley Field ebbero dati sulla regolarità o meno del moto degli aerei; ulteriori informazioni ottennero all'Aberdeen Proving Ground, al Frankford Arsenal di Philadelphia, al Naval Ordnance Bureau di Washington e alla Foxboro Instrument Company. La fonte di informazione più importante fu comunque l'Army Anti-Aircraft Board di Camp Davis, in North Carolina, che fornì loro dati di rilevamento radar circa due test di volo, il “volo 303” e il “volo 304”, con dati ad intervalli di un secondo l'uno dall'altro [cfr. Galison (1994), p. 244]. Sembra che lo scopo di questa raccolta di dati sia cambiato in corso d'opera. Scrive Wiener:

«it was decided by Section D-2 that before any definitive conclusion should be arrived at concerning carrying our theory into practice we should inform ourselves more specifically as to the actual statistical character of airplane flight and of the tracking of such flight». [Wiener's *Final Report*, p. 4.]

In sostanza Wiener era stato assecondato, ma l'obiettivo di raccogliere dati realistici fu trasformato in quello di valutare l'efficienza di diversi metodi sulla base di dati effettivi. I dati raccolti permisero a Wiener e Bigelow di redigere uno studio statistico delle traiettorie effettive degli aerei, confrontando i metodi di previsione per rotte aeree di alta quota a loro conoscenza, cioè due metodi del gruppo dei BTL, con il loro.

Ai BTL, accanto al progetto di predittore M9, era intanto maturato un secondo progetto, che avrebbe poi preso la sigla di T-15, diretto da Walter McNair e nella cui squadra era entrato Bode. Per esso era stato sviluppato un nuovo sistema di previsione, al posto del “Plan Prediction Method”, e cioè il “Memory point method”. Il nuovo metodo manteneva il carattere

¹⁰⁷ Warren Weaver, “Diary,” 1° settembre 1942, GP, Office Files of Warren Weaver, Collected Diaries, Box 71. Cito da Mindell (2002, p. 281).

trigonometrico, scartando l'eventualità della previsione curvilinea, tuttavia introduceva fondamentali miglioramenti: l'intero processo di previsione era svolto in coordinate polari; il predittore immagazzinava i dati circa la posizione dell'obiettivo in una memoria meccanica che permetteva di correggere le velocità stimate mediante un vero e proprio *feedback*, cosicché si giungeva al calcolo di una velocità media che migliorava la previsione.¹⁰⁸ Si evitavano anche i circuiti differenziatori e ciò consentiva di usare circuiti a corrente alternata che comportavano un minore effetto "drift".¹⁰⁹

Utilizzando i dati reali dei voli 303 e 304, raccolti a Camp Davis, Wiener discusse due versioni del "memory-point method" confrontandole con il proprio metodo, nel *Final report* del 1° dicembre 1942 e in una successiva lettera a Weaver del 15 gennaio 1943. Il *Wiener's Final report* riconosce che

«in particular, it is now clear that the unremovable errors of these predictions are not maller than those errors due to oscillations in the time-of-flight *feedback* cycle, etc. Present fields results are much closer to the best obtainable by any imaginable apparatus that I had expected, and I presume, than most workers in the field had espected. Accordingly, there is less scope for further work in this field than we had believed to be the case» [*Wiener's Final report*, p. 7].

Il sistema di Wiener sarebbe stato molto efficiente per tempi di volo inferiori ai 20 secondi, cioè per quote più basse, dove però i cannoni entravano in competizione con pezzi di calibro inferiore a ripetizione, per i quali erano disponibili dispositivi di mira più semplici. Per il problema d'alta quota, invece, il suo metodo statistico sulla base dei dati non risultata migliore del "memory-point method", sebbene sarebbe stato possibile in ogni caso migliorarlo con l'immissione nel predittore di dati reali [cfr. *ivi*].

Infine in una lettera a Weaver davvero conclusiva del 15 gennaio 1943, Wiener raccomandò con ancora maggiore enfasi il "memory-point method". Era convinto che il proprio metodo non lo migliorasse in maniera significativa, mentre quello dei BTL era di gran lunga di più semplice realizzazione pratica. Chiudendo la lettera non mancava di raccomandare che nel progetto dei predittori si tenesse sempre conto dei dati effettivi [Wiener a Weaver, 15 gennaio 1943. Allegata a *Report to the Services n. 59*].

L'anonimo estensore della presentazione che accompagna il *Final report* e la lettera a Weaver, conclude che

«That these particular applications did not turn out to be of practical importance does not, in our judgement, mean that the study was not well worthwhile. The general theory will doutless have other applications, and it was a matter of importance to know just how successful this statistical method would be for the antiaircraft problem» [*Report to the Services n. 59*].

A questo punto la ricerca si fermò e non fu dato a Wiener nessun altro incarico per perfezionare il progetto.

¹⁰⁸ Cfr. *Bigelow's Report of conference*, citato da Bennett (1994, pp. 60-1).

¹⁰⁹ Mindell riferisce che sebbene l'accuratezza e la velocità del T-15 si fossero dimostrate di gran lunga migliori di quelle del T-10, il T-15 non andò mai in produzione [cfr. Mindell 1995c, p. 76].

Capitolo 3 – Il primo configurarsi della Cibernetica

La Cibernetica come Ingegneria delle comunicazioni generalizzata

Nel biennio 1940-1942, attraverso la ricerca sulla previsione ed il filtraggio, Wiener matura gradualmente l'intuizione dell'avvento di un nuovo campo scientifico, di cui la stessa ricerca è parte, e che egli scorge come una ingegneria delle comunicazioni [*communication engineering*] generalizzata. Riferendosi al periodo dei colloqui insieme a Bigelow con Rosenblueth, asserisce Wiener nell'introduzione di *Cybernetics*:

«On the communication engineering plane, it had already become clear to Mr. Bigelow and myself that the problems of control engineering and of communication engineering were inseparable, and that they centered not around the technique of electrical engineering but around the much more fundamental notion of the message, whether this should be transmitted by electrical, mechanical, or nervous means. The message is a discrete or continuous sequence of measurable events distributed in time-precisely what is called a time series by the statisticians». [Wiener 1948, pp. 7-8]

In *Time, communication, and the nervous system*, il testo riveduto di una conferenza sul clono muscolare del 1946 che apparve negli atti ufficiali [*Teleological Mechanisms*], Wiener non userà più l'espressione "Communication engineering", ma "Theory of communication"; pochi mesi dopo avrebbe definitivamente scelto di chiamarla *Cybernetics, or Control and Communication in the animal and the machine* [Wiener 1948].

Dunque la nozione di una "Communication engineering" generalizzata coincide con la Cibernetica o almeno con una delle interpretazioni wieneriane di essa, quella che potremmo definire una "Cibernetica in grande", una teoria generale che tende ad includere e, se possibile, ad unificare facendone, per così dire, la somma logica tutti i campi disciplinari coinvolti: lo studio dei sistemi di comunicazione, dei sistemi di controllo, dei sistemi di calcolo e dei corrispettivi biologici di essi, il tutto ricompreso come una scienza focalizzata sulla produzione, elaborazione, trasformazione, distribuzione del messaggio, in pratica dunque tutto ciò che oggi nelle università italiane si tende a chiamare "Scienze dell'informazione", con una ulteriore estensione alle neuroscienze.

Per motivi più storici ed autobiografici che teorici – come vedremo nella terza parte del presente lavoro – a partire dal 1946, in un crescendo Wiener tese a perorare una interpretazione più ristretta della Cibernetica, che tende a focalizzarsi più sul prodotto logico delle discipline considerate, ed in particolare sugli aspetti in cui la Cibernetica in grande interseca lo studio dei sistemi biologici, specialmente del sistema nervoso umano; dunque una Cibernetica "in piccolo", che potrebbe essere più propriamente definita come "bioCibernetica" o "neuroCibernetica".

In ogni caso, la Cibernetica si profilò inizialmente secondo l'interpretazione "in grande", che Wiener intravvide inizialmente con grande entusiasmo, e che - come dimostrano anche testi posteriori al 1948 - ¹¹⁰ non sarà mai abbandonata del tutto in favore del programma ristretto, e continuò a convivere con esso nella mente di Wiener, anche perché la versione "in grande" forniva il fondamento teorico del programma "in piccolo". È per noi fondamentale chiarire cosa fosse questa Cibernetica "in grande", in quanto costituì la base unitaria sulla quale tesero a coagularsi, tra le altre cose, anche le prime riflessioni statunitensi sui computer, e servì come sfondo teorico generale per il Convegno di Princeton del 6 e 7 gennaio del 1945 di cui discuteremo nella seconda parte.

¹¹⁰ Cfr. per esempio "A new concept of communication engineering" [Wiener 1949c].

Disponiamo di molteplici testi in cui viene presentata questa idea di ingegneria delle comunicazioni generalizzata. Il primo in ordine di tempo è dato dallo stesso rapporto di guerra *The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications*, concluso il 1° febbraio del 1942 e fatto ampiamente circolare sebbene secondo le procedure riservate dell'NDRC con grado di segretezza "confidential",¹¹¹ presto ribattezzato da tecnici e matematici col nomignolo di *Yellow peril*.

Esso ci permette di comprendere al meglio come sorga l'interpretazione informazionistica della Cibernetica; vorrei però prima presentare l'*excursus* che si trova nel manoscritto sul *Muscular Clonus* [Wiener 1985c], che risale probabilmente al 1946, in cui Wiener ricostruisce con particolare chiarezza come l'ingegneria delle comunicazioni fosse andata progressivamente generalizzandosi fino ad allora.

A parere di Wiener, il primo salto precede di molto la Seconda guerra mondiale e risale agli studi riguardanti il fonografo ed in generale il nesso tra acustica e tecnologie elettriche, che avevano condotto gli studiosi a comprendere come l'oggetto dell'ingegneria delle comunicazioni non fosse esclusivamente ed essenzialmente elettrico. In quella fase erano stati stabiliti i corrispettivi meccanici dei componenti passivi dei circuiti elettrici: «Where the telephone circuit uses the concepts of resistance, induction, and capacity, the phonograph circuit employs the analogous concepts of friction, inertia, and stiffness of a spring». [Wiener 1985c, p. 489]

Questa generalizzazione dell'ingegneria delle comunicazioni fino a ricomprendere dei fenomeni meccanici, nota Wiener, tuttavia non aveva ancora toccato «the internal structure of the *science* itself» [ivi, il corsivo è mio]. Si noti, per inciso, come per Wiener tale ingegneria sia piuttosto "scienza".

Perché si giungesse ad intaccare la polpa della struttura scientifica dell'ingegneria delle comunicazioni, occorre attendere l'avvento degli amplificatori a triodi ed in generale dei circuiti attivi. Mentre nei circuiti passivi, elettrici, meccanici, o elettro-meccanici che fossero – egli continua – l'interesse degli ingegneri andava a focalizzarsi sulla trasformazione e distribuzione dell'energia, al contrario, nei circuiti attivi le considerazioni energetiche divennero scarsamente rilevanti, e l'attenzione si spostò «from the concepts of energetics to those concerning the quantity and flow of information, and of the message.» [ivi].

Con l'avvento degli amplificatori elettronici, egli spiega, l'ingegnere può controllare «a large amount of power with a smaller amount» [ivi]. Questo fatto fa risaltare la differenza tra segnale e alimentazione, che come abbiamo visto nel primo capitolo, era in realtà già apparsa nell'ambito dei controlli automatici e dei servomeccanismi non elettrici. Tuttavia l'ingegneria dei controlli automatici, continua Wiener, era restata fino alle soglie della guerra essenzialmente basata sulle equazioni differenziali lineari a coefficienti costanti e sul tempo come variabile fondamentale, mentre l'ingegneria delle comunicazioni, utilizzava in maniera ricca l'analisi armonica basandosi sulla frequenza, sfruttando il calcolo operativo di Heaviside.

La Seconda guerra mondiale aveva infine rivoluzionato tutto, facendo rifluire i raffinati metodi frequentistici dell'ingegneria delle comunicazioni nei controlli automatici e poi nello studio dei sistemi biologici [cfr. ivi, p. 489]. L'aspetto cruciale da cogliere in questa ricostruzione è nella progressiva presa di coscienza della natura dell'ingegneria delle comunicazioni, come di una teoria essenzialmente incentrata sulla produzione, elaborazione, trasformazione dell'informazione piuttosto che dell'energia. Questo punto di vista – che cela aspetti problematici – era emerso per la prima volta con chiarezza nello *Yellow Peril*.

¹¹¹ Cfr., per esempio, quanto dice Doob in Snell (1997), p. 306.

L'Ingegneria delle comunicazioni generalizzata nello Yellow peril

Nello *Yellow peril* Wiener mostra come la comprensione dell'ingegneria delle comunicazioni (telegrafia, telefonia, registrazione fonografica su disco ecc.) fosse andata modificandosi attraverso due successive sintesi tra teorie, che sono presentate nel testo in ordine cronologico invertito. Si inizia con una sintesi tra la teoria statistica delle serie temporali che va ad inglobare l'ingegneria delle comunicazioni; e poi si ricorda come l'ingegneria delle comunicazioni avesse a sua volta inglobato quella dei controlli automatici.

In una fase piuttosto avanzata della ricerca sui predittori, Wiener era stato avvisato del fatto che il suo lavoro appariva molto simile dal punto di vista matematico alla teoria dell'estrapolazione delle serie temporali da poco pubblicata da Kolmogorov in URSS. La comunicazione doveva essergli pervenuta prima del convegno ai BTL, perché già lì Wiener usa l'espressione "serie temporali". Wiener comprese con una certa difficoltà che il lavoro di Kolmogorov coincideva con il suo, anche perché quest'ultimo non riguardava in alcun modo filtri e aspetti tecnici di sorta, ma solo questioni di statistica discreta. Come ho già ipotizzato altrove [cfr. Montagnini 2005, pp. 141-5], sembrerebbe che proprio lo sforzo fatto per prendere coscienza dell'identità di fondo tra la teoria di Kolmogorov e la sua, abbia condotto Wiener alla consapevolezza, espressa nello *Yellow peril*, dell'identità sussistente tra l'elaborazione statistica delle serie temporali ed il trattamento dei segnali.

Wiener si rende conto che i messaggi sui quali opera l'ingegneria delle comunicazioni (ad esempio i messaggi telegrafici costituiti da sequenze di punti e linee in codice Morse, oppure i messaggi telefonici costituiti da una modelli [*patterns*] di onde elettriche), messaggi su cui egli aveva operato per progettare un predittore ed un dispositivo in grado di filtrare il rumore, potevano essere a tutti gli effetti assimilati alle serie statistiche temporali (anche note come serie storiche) trattate da Kolmogorov, cioè a tabelle che esprimono l'evoluzione di un carattere statistico nel tempo, come l'andamento nel tempo dei prezzi di una materia prima in borsa o quello delle temperature registrate in una città.

Di qui Wiener giunge a pensare che tutte le operazioni che i dispositivi di comunicazione compiono su un messaggio, come codifiche, scannerizzazioni, trasduzioni, filtraggi, predizioni ecc., «although carried out by electrical or mechanical or other such means, are in no way essentially different from the operations computationally carried out by the time-series statistician with slide rule and computing machine». [Wiener 1949, p. 2] Aggiungerà suggestivamente in *Cybernetics*

«One and all, time series and the apparatus to deal with them, whether in the computing laboratory or in the telephone circuit, have to deal with the recording, preservation, transmission, and use of information.» [Wiener 1948, pp. 60-1]

Dunque i dispositivi studiati dall'ingegneria delle comunicazioni, indipendentemente dal supporto sul quale operano (meccanico, elettrico ecc.) sono, secondo Wiener, in essenza delle macchine calcolatrici analogiche, come il regolo calcolatore, o digitali. come le calcolatrici da tavolo, che eseguono operazioni su messaggi, i quali possono essere considerati come serie temporali, discrete o continue. La differenza tra un centro di calcolo ed una macchina studiata dall'ingegneria delle comunicazioni risiede solo nel fatto che quest'ultima opera più rapidamente. In essenza, però, né la velocità di trattamento, né la natura del supporto risultano dirimenti per definire la specificità dell'ingegneria delle comunicazioni, il cui tratto differenziale rispetto ad altre tecnologie è dato soltanto dal fatto di operare su messaggi in quanto serie temporali.

Con la nozione di messaggio-serie temporale dello *Yellow peril*, entra in gioco per la prima volta la nozione statistica di informazione su cui sarà costruita la teoria dell'informazione di Claude Shannon, presentata nel celebre articolo "A Mathematical Theory of Communication",

ma anche in un capitolo meno noto di *Cybernetics*. Lo *Yellow peril* ci permette di comprendere la genesi stessa di questa nozione di informazione.

Occorre considerare che messaggi e serie temporali sono inquadrati da Wiener in una teoria statistica che egli chiama “meccanica statistica di Gibbs”, sebbene si riferisca ad uno stato molto evoluto di essa rispetto ai tempi dell’ipotesi ergodica di Gibbs, successivo al teorema ergodico di George D. Birkhoff (1931), ed agli ulteriori sviluppi della teoria ergodica introdotti da John von Neumann, dallo stesso Wiener e da altri.

Entro questa ottica teorica lo *Yellow peril* considera che una serie temporale o un messaggio vanno sempre considerati come scelte su un *ensemble*, a cui è a sua volta associata una specifica distribuzione di probabilità. Si tratta di un punto di vista teorico efficace, sul quale Wiener ha effettivamente costruito la sua teoria della previsione e del filtraggio. È per questa via che giunge alla nozione statistica di informazione. Leggiamo nello *Yellow peril*:

«While one does not ordinarily think of communication engineering in the same terms, this statistical point of view is equally valid there. *No apparatus for conveying information is useful unless it is designed to operate, not on a particular message, but on a set of messages, and its effectiveness is to be judged by the way in which it performs on the average on messages of this set*» [Wiener 1949, p. 4. Il corsivo è mio].

È questa la prima volta che compare la nozione statistica di informazione, al più tardi alla data del 1° febbraio 1942, almeno un lustro prima della pubblicazione della teoria di Claude Shannon, il quale trasse ispirazione dallo *Yellow peril* e probabilmente anche da conversazioni con Wiener. Il concetto chiave introdotto da Wiener campeggia nella prima pagina dell’articolo di Shannon, dove si legge: «The significant aspect is that the actual message is one selected from a set of possible messages» [Shannon 1948, p. 379]. Tutta la teoria di Shannon è poi indubbiamente inscritta in ciò che Wiener definisce “meccanica statistica gibbsiana”, sebbene il riconoscimento esplicito dei meriti di Wiener compaia solo nella terza parte, dal titolo “Mathematical preliminaries”, dove Shannon osserva:

«Wiener has pointed out the intimate relation between the invariance of physical devices under time translations and Fourier theory. He has shown, in fact, that if a device is linear as well as invariant, Fourier analysis is then the appropriate mathematical tool for dealing with the problem. An ensemble of functions is the appropriate mathematical representation of the messages produced by a continuous source (for example speech), of the signals produced by a transmitter, and of the perturbing noise. Communication theory is properly concerned, as has been emphasized by Wiener, not with operations on particular functions, but with operations on ensembles of functions.» [Shannon 1948 p. 626-7]¹¹²

Di fatto poi Wiener non giungerà mai ad una sistematizzazione vera e propria della teoria dell’informazione. Vi lavorò negli anni seguenti. Fece un abortito tentativo di pubblicare qualcosa sul tema con Joseph Doob tra il 1945 e il 1946.¹¹³ Infine il massimo sforzo consistette nel capitolo terzo di *Cybernetics* su “Time series, Information, and Communication”, che resta fondamentalmente euristico nel senso matematico del termine [Wiener 1948, pp. 60-94].

¹¹² Shannon riconosce con forza il debito verso Wiener anche in nota, asserendo che: «Communication theory is heavily indebted to Wiener for much of its basic philosophy and theory. His classic NDRC report “The Interpolation, Extrapolation, and Smoothing of Stationary Time Series,” to appear soon in book form, contains the first clear-cut formulation of communication theory as a statistical problem, the study of operations on time series. This work, although chiefly concerned with the linear prediction and filtering problem, is an important collateral reference in connection with the present paper. We may also refer here to Wiener’s forthcoming book “Cybernetics” dealing with the general problems of communication and control.» [Shannon 1948, nota 4, pp. 625-6]. Aggiunge anche negli “Acknowledgments”: «Credit should also be given to Professor N. Wiener, whose elegant solution of the problems of filtering and prediction of stationary ensembles has considerably influenced the writer’s thinking in this field.» [Ivi, p. 652]

¹¹³ Cfr. Snell (1997, p. 306) ed anche Wiener (1948, p. 16).

Per alcuni versi il rapporto che viene a stabilirsi tra le idee di Wiener sull'informazione e l'articolo di Shannon, è simile a ciò che accade nel caso della Teoria Classica dei controlli. Wiener scopre pionieristicamente il territorio introducendo una nuova ottica, dopodiché le sue idee sono sistematizzate da altri, specialmente negli ultimi tre anni della guerra; d'altro canto, come si vede dai ripetuti riconoscimenti di Shannon, il lavoro di Wiener sulla teoria dell'informazione è stato ancor più rilevante di quello relativo ai controlli automatici.

Il nesso con la *Teoria dell'Informazione*

Come abbiamo visto nel capitolo secondo la sintesi tra ingegneria delle comunicazioni e ingegneria dei controlli automatici, con la possibilità dell'estensione a quest'ultima dell'approccio frequentistico tipico della prima, era stata già intravista da Wiener nel 1940, all'inizio della ricerca, quando aveva considerato la possibilità di introdurre nell'ambito della teoria dei predittori i filtri di Wiener-Lee. Dopo la svolta informazionistica che si osserva nello *Yellow peril*, tale sintesi viene ricompresa e giustificata in termini informazionistici.

Wiener tende a stabilire una netta separazione tra una ingegneria incentrata sull'energia: la sua produzione (ad es., gli alternatori), il suo trasporto (ad es., i cavi ad alta tensione), la trasformazione (ad es. i trasformatori e i trasduttori), il suo utilizzo (motori, lampadine ecc.); ed una ingegneria incentrata sul messaggio, che coinciderebbe con la sua "*communication engineering*" generalizzata, ed in fin dei conti con la Cibernetica, che ha per oggetto il messaggio, dunque l'informazione: la sua elaborazione, trasmissione, registrazione, conservazione, previsione, filtraggio ecc. [cfr. Wiener 1949, pp. 2-3].¹¹⁴

Lo *Yellow peril* rileva che il trattamento dei servomeccanismi nell'ambito dell'ingegneria di potenza era probabilmente dovuto ai grandi livelli energetici di lavoro. In proposito ritiene rivelatrice la distinzione terminologica, ripresa poi anche in *Cybernetics*, propria della lingua tedesca di quel periodo, secondo la quale si suddivideva l'ingegneria elettrica in una *Starkstromtechnik* [elettrotecnica delle correnti forti] ed in una *Schwachstromtechnik* [elettrotecnica delle correnti deboli], e che si usava far corrispondere alla suddivisione inglese in *Power engineering* [Ingegneria di potenza] e *Communication engineering* [Ingegneria delle comunicazioni] [cfr. Wiener 1949, p. 3, nonché 1948, p. 29]. Commenterà in *Cybernetics*:

«Actually, communication engineering can deal with currents of any size whatever and with the movement of engines powerful enough to swing massive gun turrets; what distinguishes it from power engineering is that its main interest is not economy of energy but the accurate reproduction of a signal. This signal may be the tap of a key, to be reproduced as the tap of a telegraph receiver at the other end; or it may be a sound transmitted and received through the apparatus of a telephone; or it may be the turn of a ship's wheel, received as the angular position of the rudder. [...] The wonders of the automatic computing machine belong to the same realm of ideas, which was certainly never so actively pursued in the past as it is at the present day.» [Wiener 1948, p. 39]

Wiener in realtà tende a trattare in maniera informazionistica i controlli automatici e i servomeccanismi per due ragioni differenti. Da un lato in quanto è possibile trattarli con i metodi frequentistici dell'ingegneria delle comunicazioni; dall'altro perché scorge nei meccanismi a *feedback* negativo lo scorrere vero e proprio di messaggi. Si tratta, però, a mio parere di due cose diverse.

Egli ha una tendenza, in parte dovuta al suo essere un matematico, ad assimilare oggetti di studio che si possono sottoporre ad un trattamento matematico simile. Egli tende ad assimilare

¹¹⁴ Leggiamo anche in *Cybernetics*: «time series and the apparatus to deal with them, whether in the computing laboratory or in the telephone circuit, have to deal with the recording, preservation, transmission, and use of information.» [Wiener 1948, p. 61].

tutti i sistemi descrivibili mediante i metodi sviluppati entro l'ingegneria delle comunicazioni come sistemi in cui si svolgono processi comunicativi, ed a considerare informativo tutto ciò che può essere ridotto a una elemento di un *ensemble*, soggetto a considerazioni di ergodicità ed in generale statistiche. Questa a me pare una sua tentazione. Per questa via egli rischia di far diventare tutto informazionale e comunicazionistico, e non riesce più a cogliere quelli che sono i tratti davvero peculiari di un fenomeno informativo.

Per esempio, continuando sulla scia aperta per molti versi dalla ricerca su previsione e filtraggio di Wiener, nell'ultimo triennio della guerra, l'ingegnere inglese Arnold Tustin riuscirà a misurare la funzione di trasferimento degli operatori umani addetti ai sistemi antaerei. Giustamente proprio Tustin rifiuterà l'interpretazione informazionale dei grafi di flusso. D'altro canto, sebbene il metodo delle funzioni di trasferimento fosse in precedenza usuale nell'ingegneria delle comunicazioni, si può essere autorizzati *ipso facto* a considerare come comportamento informativo ogni comportamento degli operatori umani descrivibile con funzioni di trasferimento? Allo stesso modo, sebbene sia affascinante pensare che si possano eliminare dalle azioni umane gli effetti degli errori di manovra equiparandoli a rumore, ed addirittura risulti efficace costuire dei "filtri" per "filtrare" questo errore come fosse il rumore di una linea telefonica, possiamo essere sempre autorizzati a considerare il comportamento umano soggetto ad errori come un processo informativo?

D'altro canto Wiener ha scorto certamente qualcosa di tipicamente informativo nei servomeccanismi. Senonché, a mio parere, essi sembrano confermare le sue intuizioni solo per coincidenza. Leggiamo nello *Yellow peril*:

«A message need not be the result of a conscious human effort for the transmission of ideas. For example, the records of current and voltage kept on the instruments of an automatic substation are as truly messages as a telephone conversation. From this point of view, the record of the thickness of a roll of paper kept by a condenser working an automatic stop on a Fourdrinier machine is also a message, and the servo-mechanism stopping the machine at a flaw belongs to the field of communication engineering, as indeed do all servo-mechanisms.» [Wiener 1949, p. 2]

La macchina esaminata è soggetta ad un *feedback* negativo. Come nella macchina a vapore di Watt regolata dal *governor*, la grandezza da regolare (lì la velocità, qui lo spessore del foglio di carta) produce un effetto di controllo che torna su di essa. Non è detto che un *feedback* positivo sia altrettanto agevolmente da considerare dal punto di vista informazionale.

Inoltre, nel manoscritto sul *Muscular Clonus*, piuttosto che far riferimento all'attività cosciente o meno alla base del messaggio, Wiener dice che si può parlare di messaggio, «whether a message [is] introduced for transmission from an external source, or a message created within the system for the control of a piece of apparatus» [Wiener 1985c, p. 489]. Anche in questo caso è coinvolto il *feedback* negativo ed il discorso può avere il senso limitato che tale tipo di *feedback* trasmette in qualche modo in ingresso ciò che è stato rilevato in uscita.

Nei meccanismi a *feedback* negativo si cela effettivamente un fenomeno che sembra aver a che fare con la comunicazione *strictu sensu*, e che anzi forse svela alcune componenti fondamentali della comunicazione in quanto tale. Il *feedback* sembra essere un modo attraverso il quale si guida costantemente un comportamento monitorando costantemente l'obiettivo e la distanza dal raggiungimento dello stesso. Anche l'aspetto colto da Wiener in *Muscular Clonus*, relativo ai sistemi attivi, in cui si assiste alla distinzione tra sensori e attuatori, o alla distinzione tra energia di segnale ed energia di alimentazione, c'è qualcosa di non banalmente informativo. D'altro canto non si può dire che in questi aspetti il ruolo dell'energia sia marginale. Sembra che la "strategia informativa" sia un tipo specifico di relazione caratterizzata dalla bassa energia, che sia gli organismi o i servomeccanismi intrattengono con l'ambiente o con altri sistemi.

Allo stesso modo, i servomeccanismi ed in generale tutti i sistemi di controllo sembrano manifestare una natura fondamentalmente ibrida: tendono ad essere maggiormente “informativi” nella misura in cui si ha a che fare con l’area sensoriale; mentre sono maggiormente “energetici” nella misura in cui si ha a che fare con l’area degli attuatori. Vedremo più avanti che Kennett Craik dirà delle cose interessanti in proposito. Allo stesso modo farà Wiener in una fase di riflessione più avanzata, quando introdurrà la distinzione tra “accoppiamento informativo” e “accoppiamento energetico” [cfr. Wiener 1950, nota 1, p. 23]. Si tratta qui – a mio parere – di relazioni concettuali che sembrano riguardare il fenomeno del comunicare e il concetto di informazione a un livello direi “pre-simbolico” e in qualche modo costitutivo del fenomeno stesso del comunicare. Discuteremo comunque ulteriormente queste questioni nel capitolo 12 del presente lavoro.

Le concezioni filosofiche di Norbert Wiener

Nella concezione wieneriana della Cibernetica, che in questa fase ha ancora le sembianze della Communication engineering generalizzata, opera in maniera robusta il suo *background* filosofico, che d’altro canto ha sempre guidato anche la sua ricerca matematica. Wiener era in debito nei confronti dell’ambiente del primo pragmatismo americano in cui era stato educato, un ambito che, come ha asserito il filosofo Richard Bernstein, «shares a cosmological vision of an open universe in which there is irreducible novelty, chance, and contingency» [Bernstein 1992, pp. 813-4]. Tale influenza si riflette nella visione wieneriana di una «essential irregularity of the universe» [Wiener 1956, p. 323], nonché nella fiducia nella superiorità di una descrizione della natura mediante leggi probabilistiche e statistiche, fiducia che risale a Charles Sanders Peirce (1839-1914), per la mediazione di Josiah Royce [Cfr. spec. la conferenza di Royce, *The mechanical, the historical and the statistical* (1914) e per un commento Montagnini 2005, pp. 32-5].

Nel biennio accademico 1911-’13, in cui era stato a Harvard per il conseguimento del *Ph.D.* in filosofia, Wiener aveva anche frequentato un seminario interdisciplinare su “A comparative study of various types of scientific method” [cfr. Smith 1963 e Skaff 1986] tenuto da Royce, dal quale ebbe «some of the most valuable training I have ever had» [Wiener 1953, pp. 165-6], tanto da citarlo nelle prime pagine di *Cybernetics* [pp. 1-2]. Nel seminario conobbe tra gli altri il fisico e filosofo Percy Bridgman [cfr. Wiener 1953, p. 166], il quale era influenzato a sua volta dal pragmatismo americano, da Ernst Mach e dalla teoria della relatività di Einstein, e già stava indirizzandosi verso la sua filosofia operazionistica, la concezione secondo cui i concetti della scienza hanno senso nella misura in cui sono riducibili alle operazioni effettive con cui essi vengono stabiliti e misurati [Bridgman 1927]. L’operazionismo di Bridgman lasciò un impronta duratura su Wiener, che tenderà ad adottarlo anche nell’ambito della conoscenza matematica.

Un altro studioso di spicco conosciuto nel seminario di Royce fu Lawrence J. Henderson (1878-1942), che dal 1904 insegnò chimica biologica alla Harvard Medical School. Tra il 1904 e il 1912 Henderson studiò gli equilibri acido-base nelle soluzioni “tampone”, cioè tali che sfruttando i cambiamenti della velocità di dissociazione di particolari sostanze, riescono a mantenere costante il grado di acidità, quando si aggiungono dall’esterno ulteriori quantità di acidi o di basi. In seguito si dedicò a studiare il sangue come soluzione “tampone” e giunse all’idea che tra tutti i sistemi tampone possibili il corpo utilizzava quelli più adatti in relazione a tutti gli altri processi dell’organismo. Nel libro *The fitness of the environment* [Henderson 1913] presentò una visione organicistica secondo la quale le funzioni biologiche non possono essere studiate isolatamente, e dove considera come principale caratteristica degli esseri viventi la capacità di regolare un complesso di processi interni che ne garantiscano l’adattamento con

l'ambiente esterno. Tali studi si muovono sulla scia del fisiologo francese Claude Bernard (1813-1878), secondo il quale la proprietà essenziale dell'organismo vivente è di conservare costanti le condizioni fisico-chimiche del proprio ambiente interno o *milieu interieur*, mentre si mantiene in continuo scambio con l'ambiente esterno [cfr. ad es. Allen 1978].

Il giudizio di Wiener nei confronti di Henderson non è tra i più positivi.¹¹⁵ Nonostante si sia tentati di inquadrare la Cibernetica entro una cornice olistica ed organicistica à la Henderson, in realtà Wiener non fu mai attratto più di tanto da tali concezioni. Quando dopo poco più di un decennio di concentrazione sulla ricerca matematica e fisica, all'inizio degli anni Trenta Wiener riallacciò rapporti con fisiologi essi saranno caratterizzati dalle cifre della statistica matematica e dallo studio sperimentale del sistema nervoso, piuttosto che l'olismo-relazionismo. In particolare egli stabilì rapporti duraturi con due fisiologi di spicco J. B. S. Haldane e Arturo Rosenblueth.

L'amicizia con J. B. S. Haldane (1892-1964), risale ad un soggiorno a Cambridge (UK) nel 1931-'32. Haldane era uno dei principali creatori della genetica delle popolazioni, teoria statistica che fonde teoria dell'evoluzione di Darwin e genetica mendeliana, e si occupò anche di fisiologia e di biometria. Nel saggio su *The role of the observer* (1936) Wiener mostrerà di non condividere fino in fondo la metafisica materialistico-panpsichistica di Haldane della quale gli interessavano soprattutto gli esiti epistemologici. Peraltro l'incontro con Haldane ricondusse Wiener a riflettere su una problematica a cui si era dedicato negli anni filosofici, quella della sintesi tra mondo della vita e della mente con la sfera dell'inanimato.

L'interesse di Wiener per le questioni epistemologiche e la fisiologia fu ulteriormente rinsaldato dalla partecipazione, sempre negli anni Trenta, ad un seminario mensile sul metodo scientifico organizzato alla Harvard Medical School dal medico fisiologo Arturo Rosenblueth (1900-1970), conosciuto come "club delle cene neurologiche" [cfr. ad esempio Heims 1991, it p. 189] o come "Club di filosofia della scienza" [cfr. Masani 1990, p. 197], che Wiener aveva cominciato a frequentare su invito del fisico dell'MIT Manuel S. Vallarta. Al seminario partecipavano non solo fisiologi ma anche studiosi di altre discipline, afferenti specialmente a Harvard ed all'MIT. Questi incontri lo coinvolsero profondamente e in *Cybernetics* ne parlerà in maniera entusiastica [cfr. Wiener 1948, pp. 1-2].

Rosenblueth era l'assistente più caro del fisiologo Walter B. Cannon (1871-1945). È interessante cogliere le differenze tra l'approccio di Henderson e quello di Cannon e del suo erede scientifico Rosenblueth. Alla base della fisiologia di Cannon c'erano le stesse convinzioni olistiche del suo collega Henderson, tanto che fu Cannon a coniare il termine omeostasi per indicare lo stato di equilibrio dinamico che l'organismo tende a conservare. Tuttavia, durante la Prima guerra mondiale, Cannon si era occupato soprattutto del fenomeno dello shock nei soldati, che egli interpretò come la rottura di uno stato di equilibrio, dovuta ad incapacità a controllare le sequenze dei processi. Egli insiste molto più di Henderson sui meccanismi che per assicurare l'equilibrio non dipendono da azioni biochimiche locali, come nei sistemi tampone, quanto piuttosto dall'azione dei sistemi di livello superiore come quello nervoso ed quello endocrino. Così l'attenzione di Cannon si sposta verso regolazioni più complesse, studiando in particolare il sistema nervoso simpatico, che è una parte del sistema nervoso autonomo. Mediante esperimenti di rimozione progressiva del sistema simpatico su animali, egli dimostrò il ruolo cruciale di esso nel controllo dei sistemi di regolazione dell'organismo [cfr. Allen 1978, it pp. 152-5].

¹¹⁵ Cfr. per il giudizio di Wiener nei confronti di Henderson, quanto scrive nel primo volume dell'autobiografia, in cui sostiene che Henderson associava alcune idee veramente brillanti ad una penosa incapacità a collocarle in una qualche struttura filosofica [cfr. Wiener 1953, p. 166].

L'uso di un metodo sperimentale estremamente scrupoloso e l'attenzione per meccanismi di regolazione riguardanti i sistemi più complessi dell'organismo ed in particolare il sistema nervoso centrale, tipici di Cannon si ritrovano in Rosenblueth. E si può comprendere come Wiener abbia potuto trovare proprio in Rosenblueth, la sponda adatta per una estensione della sua "Communication engineering" al sistema nervoso animale inteso come sistema principale sistema di comunicazione nell'organismo. Ad una collaborazione effettiva tra i due, però, non si giunse prima della ricerca di Wiener sui predittori.

Le discussioni in seno al club delle cene neurologiche fino alla Seconda guerra mondiale vertevano essenzialmente su questioni epistemologiche e metodologiche [Wiener 1956, p. 171]. Come ci racconta Wiener in *Cybernetics*, vi si rifletteva sulle conseguenze di una specializzazione eccessiva nella scienza, che aveva provocato una situazione paragonabile all'Oregon dei tempi della colonizzazione,¹¹⁶ in cui era stato colonizzato contemporaneamente da diverse nazioni, provocando sul suo territorio un'inestricabile groviglio di nomenclature e leggi [cfr. Wiener 1948, p. 2]. Così nella scienza

«every single notion receives a separate name from each group, and in which important work has been triplicated or quadruplicated, while still other important work is delayed by the unavailability in one field of results that may have already become classical in the next field» [ivi].

Wiener si era trovato perfettamente d'accordo con Rosenblueth sull'importanza della collaborazione interdisciplinare, per una fecondazione reciproca ed in vista di una unificazione del campo di studio. Tale principio è stato una delle principali bussole di Wiener nella stessa ricerca matematica e fisica; allo stesso modo lo abbiamo visto all'opera nell'idea di una ingegneria delle comunicazioni generalizzata, anche a prescindere dall'estensione al mondo del vivente. Nel quadro della ricerca sui predittori Wiener tese naturalmente ad oltrepassare il confine tra non vivente e non vivente.

Il nesso con lo studio dei sistemi biologici

In *Time, communication, and the nervous system*, testo riferito ad una conferenza del 1946, Wiener definisce la Cibernetica, che per ora chiama "Theory of communication", nel seguente modo:

«We now propose to introduce ideas belonging to the Gibbsian statistical mechanics into the theory of communication. This theory covers what is classically known as communication engineering and a number of other fields as well. The theory of the telephone is, of course, communication engineering, but the theory of the computing machine belongs equally to that domain. Likewise, the theory of the control mechanism involves communication to an effector machine and often from it, although the machine may not be watched by any human agent. The neuromuscular mechanism of an animal or of a man is certainly a communication instrument, as are the sense organs which receive external impulses. [...]

The unifying idea of these diverse disciplines is the message, and not any special apparatus acting on messages.» [Wiener 1948a, p. 202]

Oltre ai servomeccanismi, dunque la sua "Teoria della comunicazione" deve includere anche lo studio dei meccanismi neuromuscolari degli animali e degli esseri umani. Più avanti

¹¹⁶ Interessanti sulla metafora dell'Oregon sono le osservazioni di Antonio Lepschy, che chiarisce: «per quel che riguarda l'Oregon, fra la fine del diciottesimo e l'inizio del diciannovesimo secolo tale nome designava un vasto territorio, ben più esteso dell'attuale stato degli USA. [...] Nel periodo al quale si riferisce Wiener coesistevano le rivendicazioni degli Stati Uniti, della Gran Bretagna, dell'impero Russo e del Messico che aveva ripreso quelle già avanzate dalla Spagna, la regione era ancora molto scarsamente abitata ma gli insediamenti dei piccoli gruppi provenienti dalle potenze interessate si distribuivano a macchia di leopardo» [cfr. Lepschy 1998, pp. 187-8]. Possiamo dunque immaginare un territorio parzialmente colonizzato ed in cui le stesse aree avevano nomi diversi ed erano soggette a culture e giurisdizioni diverse.

dirà che essa include anche lo studio delle “computing machines” (sia analogiche che digitali), con i loro corrispettivi neurologici [cfr. *ivi*, p. 208-210]. Entrambi gli aspetti erano già stati intravisti nella configurazione che la “Communication engineering” aveva assunto nello *Yellow peril*, sebbene quello relativo al calcolo fosse appena abbozzato (si ricordi il citato passo in cui si parla dei regoli calcolatori e delle calcolatrici per trattare le serie temporali), mentre l’aspetto biologico e neurofisiologico fosse stato tralasciato in quel rapporto di guerra che era destinato essenzialmente a presentare la teoria matematica della previsione e del filtraggio. Esso si ritrova però ampiamente trattato in numerosi documenti coevi. Discuteremo a lungo il tema delle relazioni tra Cibernetica e calcolo automatico nella Seconda e Terza parte della presente ricerca, ora è utile soffermarsi sul ruolo che le discipline biologiche e neurologiche assunsero in questa fase iniziale della riflessione Cibernetica.

Come si è visto, Wiener si era occupato delle componenti umane implicate nella centrale di tiro antiaereo sin dall’inizio della ricerca. Era stato il suo approccio statistico a spingerlo a conoscere le caratteristiche statistiche del comportamento dei piloti e degli artiglieri; perciò si può dire che la sua “communication engineering” nella misura in cui si sostanzia in una “statistica gibbsiana” si andava ad estendere con naturalezza ai sistemi biologici implicati.

Da una serie di documenti di Wiener di questo periodo emerge la convinzione che l’operatore umano possa essere trattato alla stregua di un dispositivo elettrico o meccanico, secondo un approccio behavioristico sofisticato. Troviamo questo concetto in una lettera del 22 giugno 1942, indirizzata al un caro amico J. B. S. Haldane.

Wiener lo mette al corrente di «some biological work which I am carrying out together with Arturo Rosenblueth».¹¹⁷ Lo informa di aver avuto la necessità di studiare il comportamento umano in maniera più sofisticata di come si fa nelle teorie comportamentistiche in voga, per analizzare «the intrinsic possibilities of types of behavior [...] in connection with the design of apparatus to accomplish specific purposes in the way of the repetition and modification of time patterns.»¹¹⁸

La definizione dell’approccio utilizzato da Wiener e Bigelow come “behavioristico” si ritrova anche in un’annotazione nel diario di Stibitz del 1° luglio 1942, lo stesso giorno in cui era stata data la dimostrazione del modello di predittore. Si legge:

«W[iener] points out that their equipment is probably one of the closest mechanical approaches ever made to physiological behavior. Parenthetically, the Wiener predictor is based on good behavioristic ideas, since it tries to predict the future actions of an organism not by studying the structure of the organism but by studying the past behavior of the organism».¹¹⁹

Nella lettera a Haldane, Wiener aggiunge che il problema

«of examining the behavior of an instrument from this point of view is fundamental in communication engineering and in related fields where we often have to specify what the apparatus between four terminals in a box is to do for we take up the actual constitution of the apparatus in the box.»¹²⁰

Nel discorso di Wiener registrato da Stibitz, come nelle righe dirette a Haldane compare la nozione di behaviorismo associata a quella di *black box* tipica della “communication engineering”, cioè di un dispositivo è studiato come un quadripolo dotato di un ingresso ed un’uscita; metodo su cui aveva a lungo insistito Heaviside, e che Wiener conosceva a fondo

¹¹⁷ Lettera di Wiener a J.B.S. Haldane, 22 giugno 1942 (WAMIT), Box 4, folder 62. Cito da Piccinini (2003, pp. 38-9).

¹¹⁸ *Ivi*.

¹¹⁹ George R. Stibitz, “Diary”, 1° luglio 1942 (NARA), Record Group 227, Records of the OSRD, General Project Files, Project #6. Cito da Galison (1994, p. 243).

¹²⁰ Lettera di Wiener a J.B.S. Haldane, 22 giugno 1942 (WAMIT) Box 4, folder 62. Cito da Piccinini (2003, pp. 38-9).

tanto che la proposta della ricerca sorse dall'idea di applicare al problema della previsione il calcolo operativo, cercando le funzioni di trasferimento opportune ecc. Tale metodo prescinde dalla struttura effettiva interna della *black box*, in quanto essa è esuastivamente descritta dalla funzione di trasferimento, che permette di determinare la funzione di uscita conoscendo quella di ingresso. Si tratta indubbiamente di un approccio behavioristico, evolutosi indipendentemente da quello in voga tra psicologi e fisiologi nella prima metà del Novecento. Una volta che, infatti, si sia compreso che un sistema socio-tecnico, come ad esempio, una postazione antiaerea dotata di radar, predittore, cannone ed equipaggio, può essere rappresentato con uno schema a blocchi, dotati ciascuna di una funzione di trasferimento, prescindendo dal fatto che si abbia a che fare con componenti elettriche, meccaniche o biologiche, fu naturale per l'ingegnere elettrico considerare l'uomo come un blocco tra altri del suo schema a blocchi. Con un po' di fatica in più fu naturale anche per lo psicologo behaviorista, abituato a studiare le risposte a stimoli prescindendo da ciò che avviene nella mente del soggetto, e per il fisiologo behaviorista, abituato a studiare le risposte a stimoli a prescindere dalla struttura anatomo-fisiologica dell'organismo, vedere in questo approccio la possibilità di un behaviorismo sofisticato.

Queste relazioni concettuali sono state facilmente colte da Wiener, un matematico imbevuto di filosofia pragmatista e di operativismo alla Bridgman abituato a lavorare con il calcolo operativo, come del resto da un ingegnere elettrico come Bigelow, e da un neurofisiologo come Rosenblueth, aduso alle idee comportamentistiche nonché a studiare le risposte fisiologiche degli organismi a stimoli tramite oscilloscopio [cfr. ad es. Rosenblueth *et al.* 1942].

Behavior, Purpose and Teleology

Lo *Yellow Peril* sebbene abbia avuto la possibilità di circolare ampiamente tra gli addetti alle ricerche militari appartenenti alle discipline più varie, sia in America che in Inghilterra, non fu conosciuto dal grande pubblico fino al 1949, quando Wiener ne ottenne la declassificazione e poté essere pubblicato. Probabilmente a causa della sua natura molto matematica esso non ebbe anche allora la stessa risonanza di altre pubblicazioni di Wiener.

Molto diversa fu invece la fortuna dell'articolo "Behavior, Purpose and Teleology", uscito sul numero di gennaio del 1943 di *Philosophy of Science*, periodico filosofico che già in passato aveva accolto contributi di biofisica. Curiosamente, in questo articolo l'approccio informazionistico che si profila nello *Yellow peril*, uscito undici mesi prima, è sostanzialmente assente, come anche il behaviorismo di cui si è detto nel precedente paragrafo appare a mio parere più di facciata che reale. L'articolo presenta piuttosto i risultati delle conversazioni intercorse tra Wiener e Bigelow con Rosenblueth, nel corso della ricerca sui predittori. Anzi esso costituisce uno dei pochi squarci di luce resi pubblici sulle ricerche di guerra relative ai controlli automatici, e tale sarà destinato a restare, se si considera che nell'ottobre 1943, Hazen e Weaver ¹²¹ vietarono la sessione sui servomeccanismi in programma per il convegno pubblico dell'American Institute of Electrical Engineers, ritenendo «undesirable to use the words servomechanisms or even automatic control» in un avviso pubblico.¹²² Fatto che fa sorgere anche il ragionevole dubbio che "Behavior, Purpose and Teleology" non fosse stato autorizzato, e forse nemmeno gradito più di tanto dalla Sezione D-2, visto che vi si parlava al

¹²¹ Ricordiamo che erano a quella data rispettivamente il capo della ex Section D-2 (fire control) ora ridenominata Division 7 (fire control), ed il suo il predecessore, comunque restato nella .

¹²² Cfr. Warren Weaver, Diary, 8 ottobre 1943; lettera di Warren Weaver a P. Cromwell, New York University, 7 ottobre 1943; lettera di Hazen a Edward Moreland, 11 ottobre 1943, OSRD E151 AMP General Records, Box 5m Servomechanisms folder. Fonti citate da Mindell (2002, p. 209 e alla nota 4 p. 370).

contrario con una certa libertà di servomeccanismi e di controlli automatici, e vi si faceva anche cenno ad armi specifiche, come ai siluri in grado di cercare da soli la mèta. Nell'articolo si parlava anche del *feedback* applicato sia agli amplificatori che ai servomeccanismi. Vi si leggeva:

«The expression feed-back is used by engineers in two different senses. In a broad sense it may denote that some of the output energy of an apparatus or machine is returned as input; an example is an electrical amplifier with feed-back. The feed-back is in these cases positive - the fraction of the output which reenters the object has the same sign as the original input signal. Positive feed-back adds to the input signals, it does not correct them. The term feed-back is also employed in a more restricted sense to signify that the behavior of an object is controlled by the margin of error at which the object stands at a given time with reference to a relatively specific goal. The feed-back is then negative, that is, the signals from the goal are used to restrict outputs which would otherwise go beyond the goal. It is this second meaning of the term feed-back that is used here».[Rosenblueth, Wiener e Bigelow (1943), p. 19]

Si trattava molto probabilmente della prima volta che - in un contesto pubblico - la nozione di *feedback* tipica della teoria degli amplificatori elettronici appariva trapiantata nel campo dei servomeccanismi e, forse, è questo fatto che ha accreditato tra molti non addetti ai lavori, allora ma anche successivamente, la convinzione errata secondo cui Wiener sia da ritenere come il “padre del *feedback*”.

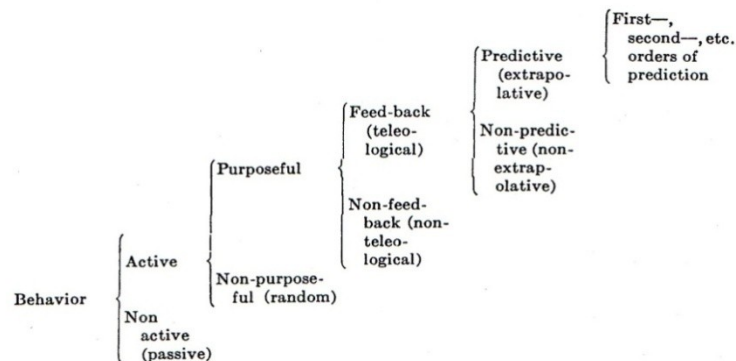
Ad un esame dettagliato del testo citato, la definizione del concetto di *feedback* si rileva tra l'altro ancora immatura dal punto di vista teorico. In particolare quando si dice che il *feedback* degli amplificatori è quello positivo, non si tiene conto degli amplificatori reazionati di Black, che sono a *feedback* negativo. Ciò fa sorgere il sospetto che alla data del gennaio 1943 gli autori non avessero ancora una chiara conoscenza del metodo di stabilità di Nyquist e perciò nemmeno della sua possibile applicazione nel contesto dei controlli automatici. Di fatto solo il triennio 1943-'45 condurrà ad una sistemazione rigorosa della materia. Nell'immediato dopoguerra tra altre pubblicazioni apparve il manuale su *Fundamental theory of servomechanisms* (1945) di MacColl, frutto del lavoro di una commissione sui servomeccanismi costituita da Warren Weaver dopo il 1943. In esso si delinea in maniera accurata una teoria del *feedback* lineare, comprendente organicamente sia la tecnologia degli amplificatori elettronici reazionati che quella dei controlli automatici e dei servomeccanismi. La trattazione del *feedback* che si ritrova in *Cybernetics* - in cui si cita più volte con ammirazione il manuale di MacColl - è finalmente emendata dalle imprecisioni di “Behavior, Purpose and Teleology”. Tuttavia è probabile che, per motivi culturali, né il manuale di MacColl né il capitolo di *Cybernetics* dedicato al *feedback*, siano stati letti dalla maggior parte dei lettori di “Behavior, Purpose and Teleology”, e questo contribuirà a diffondere una cattiva conoscenza del concetto.

Questa situazione riguardo al *feedback* esemplifica quanto nuove e non ancora stabilizzate fossero le nozioni della Cibernetica e mostra un delicato aspetto in cui si vennero a trovare nell'ambito delle Macy Conferences on Cybernetics, matematici e ingegneri incontrandosi con esponenti delle scienze socio-umane. Qui, i primi erano consapevoli della cautela con cui era necessario maneggiare i concetti della Cibernetica, ancora per molti versi *sub judice*, mentre i non addetti ai lavori tendevano a prenderli come oro colato. In queste circostanze, commenta Wiener, «I have deliberately refrained from giving advice that, as I was convinced, would be bound to lead to a flood of superficial and ill-considered work» [Wiener 1964, p. 88].

“Behavior, Purpose and Teleology” condusse anche ad altri fraintendimenti nella comprensione della Cibernetica, sia tra i suoi ammiratori che tra i suoi detrattori. A ciò accenneremo tra poco; vorrei però prima presentare la sostanza dell'articolo.

Tutto sommato l'im maturità teorica complessiva sopra rilevata non influenza significativamente il tema portante dell'articolo, in quanto quel che conta in esso è l'idea di "feedback negativo" in quanto tale, sul quale non vi sono particolari incomprensioni.

L'articolo prospetta una classificazione del comportamento animale a seconda, diremmo, della progressiva complessità "intenzionale" [*purposeful*], pervenendo al seguente schema:



La classificazione è ottenuta con dicotomie successive, secondo un approccio comparativo molto spinto tra macchine e animali, nella consapevolezza della intrinseca differenza tra le strutture interne con cui comportamenti simili possono essere realizzati. La prima dicotomia "attivo/passivo" corrisponde, alla distinzione tipica dell'elettronica [cfr. Masani 1990, p. 202]. L'idea che un sistema di controllo debba essere necessariamente attivo rientra nella tradizione dell'MIT, la ritroviamo anche in MacColl (1945), ma se è una condizione necessaria per avere un servomeccanismo non lo è per avere un sistema di controllo a *feedback* negativo: altrimenti dovremmo escludere il più osannato dei dispositivi di controllo, cioè il "governor" nella versione originale di Watt, che – come abbiamo visto nel primo capitolo – non possedeva fonti ausiliarie di energia ed era dunque un dispositivo "passivo" che traeva tutta l'energia dall'input.

In effetti la dicotomia potrebbe essere sviluppata da entrambe le parti, e ciò vale anche per molte successive ramificazioni. Ad ogni modo, i dispositivi o organismi attivi sono poi suddivisi in intenzionali e non. I primi sono caratterizzati da comportamenti che non avvengono in maniera casuale, ma secondo una decisione volontaria. Su questo punto l'articolo è chiaro: vuole discutere i comportamenti animali palesemente intenzionali e volontari, in cui si ha «awareness of "voluntary activity"». La volontarietà è assimilata all'avere uno scopo, una mèta da raggiungere. Tuttavia, non si entra nel merito di come l'organismo o la macchina giungano alla deliberazione, cioè a fissare lo scopo e sicuramente gli autori non hanno alcuna intenzione di ricorrere al *feedback* negativo per spiegarlo.

AmMESSO perciò di avere un comportamento intenzionale, cioè volto a scopo, si distingue tra due tipologie. Quella in cui rientra un *feedback* negativo, che è detta "comportamento teleologico" e quella in cui tale *feedback* non rientra. Le esemplificazioni portate dagli autori chiariscono molto bene ciò che si vuole sostenere: esempio di un "comportamento volontario teleologico" è il gesto dell'allungare una mano per afferrare un bicchiere. In questo caso si ipotizza che il movimento della mano sia controllato in corso d'opera da un costante monitoraggio della distanza tra la mano ed il bicchiere. Mentre un esempio di "comportamento volontario non teleologico" è quello di un serpente che si scaglia su una rana, oppure quello di una rana che voglia prendere una mosca. In questi casi, notano gli autori, il costante monitoraggio del movimento mediante *feedback* negativo è da escludersi, poiché

«indeed, the movement is in these cases so fast that it is not likely that nerve impulses would have time to arise at the retina, travel to the central nervous system and set up further impulses which would reach the muscles in time to modify the movement effectively». [Roseblueth *et al.* 1943, p. 20].

In questo caso si dovrà invece ipotizzare che l'organismo segua un modello comportamentale prefissato.

Si raggiunge il punto cruciale di questa riflessione, con il sostenere che nel caso in cui intervengono *feedback* negativi si deve ipotizzare anche l'esistenza di meccanismi atti a stabilizzare tale processo, dunque qualcosa di simile agli smorzatori [*dampers*] che stabilizzavano i regolatori centrifughi successivi a quello di Watt e, ovviamente, anche situazioni in cui tali meccanismi cessino di funzionare. Dato che la letteratura clinica evidenzia effettivamente delle patologie come il tremore di mèta, associate a lesioni del cervelletto, in cui la mano del malato, nell'atto di afferrare un oggetto, manca la presa ed inizia ad oscillare, gli autori ipotizzano che quello sia appunto il caso di un "comportamento volontario teleologico", reso instabile da un *feedback* privo di smorzatore, e concludono che:

«The analogy with the behavior of a machine with *undamped feed-back* is so vivid that we venture to suggest that the main function of the cerebellum is the control of the feed-back nervous mechanisms involved in purposeful motor activity.» [Roseblueth *et al.* 1943 p. 20. Il corsivo è mio].

È fondamentale considerare tutto questo discorso come un ragionamento comparativo di tipo ipotetico, che richiede conferme sperimentali, sebbene l'esistenza di una patologia come il tremore di mèta sia un buon passo in avanti. Ed in effetti l'articolo vuole solo mostrare come queste relazioni concettuali possano condurre a buone congetture popperianamente falsificabili, diremo oggi, in sede sperimentale.

Tralasciando le successive dicotomie, che integrano nell'albero classificatorio anche i predittori, vorrei far notare come il far ricorso al termine "teleologico" – uso del quale il responsabile è molto probabilmente Wiener – che deve averlo ereditata dai suoi trascorsi con Josiah Royce, abbia fatto più male che bene alla corretta comprensione dell'articolo.

Storicamente una spiegazione teleologica è quella che attribuisce una volontarietà agli eventi. Dal punto di vista della razionalità moderna non è accettabile un argomento come quello che usa la Bibbia quando dice che luna e sole sono posti in cielo allo scopo di illuminare la notte [cfr. Genesi 1, 14-18]. D'altro canto in fisiologia, si è accettato un linguaggio teleologico per spiegazioni funzionali, Kant nella *Critica del Giudizio* parla in proposito di "teleologia naturale". Una lunga tradizione che risale almeno al Settecento, fa ricorso a schemi causali circolari per spiegare come gli organismi controllino determinati livelli ematici (ph, glucosio ecc.), la temperatura corporea, ecc. Questi processi sottintendono spesso delle catene di *feedback* negativi e positivi. Non c'era certamente bisogno di attendere "Behavior, Purpose and Teleology" per comprendere questo fatto. L'errore interpretativo in realtà che spesso si è fatto è nel credere che Rosenblueth *et al.* (1943) abbiano voluto "meccanizzare la teleologia", come si esprime McCulloch (1966). Questo era stato già mirabilmente fatto da *The fitness of the environment* (1913) di Henderson o da *Wisdom of the body* (1939) di Cannon. La questione è un'altra: Rosenblueth *et al.* (1943) si occupano di comportamenti che sono intenzionali, volontari, cioè "teleologici" senza ombra di dubbio.

Una cosa che l'articolo omette di fare, e questa è oggettivamente una mancanza, è di non distinguere sufficientemente tra comportamenti verso mèta a *feedback* in cui lo scopo è stabilito dal soggetto e quelli che, come nel caso di un siluro ad autoguida seguono una mèta fissata da chi lo lancia, basandosi sul rumore o sulla profondità. Gli autori giustificano però preventivamente questo fatto mediante il riferimento all'approccio behavioristico:

«Given any object, relatively abstracted from its surroundings for study, the behavioristic approach consists in the examination of the output of the object and of the relations of this output to the input. By output is meant any change produced in the surroundings by the object. By input, conversely, is meant any event external to the object that modifies this object in any manner» [Rosenblueth *et al.* 1943, p. 18].

La distinzione tra comportamento intenzionale a feedback, con mèta auto-stabilita ed mèta etero-stabilita non viene fatta perché gli autori non la trovano di immediato interesse, in quanto a loro parere come viene stabilita la mèta non influenza il comportamento successivo alla deliberazione. La novità dell'articolo va cercata semplicemente nel fatto che, paradossalmente, anche alcuni comportamenti che si classicherebbero come volontari e intenzionali, cioè teleologici al 100%, si qui suppone che siano anch'essi in parte soggetti a meccanismi involontari. L'articolo non dice nulla circa la questione di come avvenga la deliberazione che precede i comportamenti descritti. Nondimeno l'approccio scelto è suggestivo ed apre la strada ad una successiva sperimentazione. L'articolo assume per la successiva ricerca Cibernetica una valenza altrettanto paradigmatica dello *Yellow peril*, facendo intravedere la possibilità di un programma di biofisica o di biomatematica, in cui matematici, ingegneri e neurofisiologi, possono collaborare insieme ed in cui la conoscenza delle macchine può aiutare a comprendere meglio gli esseri viventi e viceversa.

Capitolo 4 – Epilogo della ricerca sui predittori e note di sociologia della scoperta

Prima di continuare con il nostro approfondimento del divenire concettuale della Cibernetica, soffermandoci in particolare sul suo rapporto con la genesi del computer e sullo studio del cervello, vorrei approfondire alcune vicende ed aspetti che possono apparire a prima vista collaterali rispetto a contenuti più tecnici, ma che in realtà ne condizionarono pesantemente gli sviluppi.

La scienza pura non è brevettabile!

Wiener si era buttato a capofitto nella ricerca; nel periodo più intenso aveva dovuto passare intere notti a far calcoli da solo ed assumendo benzedrina, cioè un'anfetamina [cfr. Wiener 1956, p. 249]. Lavorava con la passione che lo aveva sempre animato; e con la consapevolezza che stava combattendo il nemico nazista dalla sua trincea all'MIT. Non pensò affatto a questioni brevettuali, almeno fino al marzo 1942, quando un fisico informò Warren Weaver che Wiener

«seems in an unusually bad nervous state the last few days, and I have been trying to get him to take a few days' rest. He had an unfortunate clash with the cleared patent attorney whom M.I.T. had asked to study some of his ideas on circuit theory [...]».¹²³

Non sappiamo precisamente quale fosse la materia del contendere. Dobbiamo però rilevare che le prime domande di riconoscimento di brevetto sui predittori da parte dei BTL risalgono al 1° maggio 1941 [cfr. *US Patent nr. 2.408.081*] e quelli del Servo Lab al 20 settembre 1941 [*US Patent nr. 2.409.190*] mentre non ne risulta nessuna a nome di Wiener e/o Bigelow, sebbene la loro ricerca riguardasse dispositivi pratici.

Inoltre le questioni circa la politica dei brevetti tornano prepotentemente nelle pagine del Wiener del dopoguerra, in particolare in *The Human Use of Human Beings* (1950), in *Invention*, opera del 1954 uscita solo postuma [Wiener 1993], e nel romanzo *The Tempter* (1959), che tratta della vicenda del geniale e sfortunato inventore Heaviside, libro che Wiener volle fosse pubblicato al posto di *Invention*, scrivendo al consulente editoriale Epstein: «la storia è davvero uno svolgimento in forma romanzata delle mie idee sull'invenzione nel mondo moderno».¹²⁴ In questi libri Wiener non entra in dettagli personali, però ne emerge una protesta insistente ed amara che ritorna su un punto in particolare e cioè che certe invenzioni siano considerate “legge di natura,” e dunque non brevettabili. Leggiamo in *The Human Use of Human Beings* (1950):

«For example, at the present time the problem of designing an electric circuit for a particular purpose has come to be merged in the problem of designing all electric circuits for any purposes. At such a stage, the next step is likely to clarify a whole field simultaneously. In the language of the Patent Office, this new step will be, not an invention extending the previous set of inventions, but the discovery of a law of nature» [p. 119].

È difficile che non stia parlando di sé perché, malgrado un linguaggio studiatamente neutro, subito dopo egli richiama particolari che rinviano alla ricerca sui predittori. Scrive:

«Make an electric circuit by a process of trial and error, and if it has any perceptible features to differentiate it from existing circuits, it is a good invention. Make the optimum circuit possible by

¹²³ Lettera di Boyce a Weaver, 23 marzo 1942, cito da Galison (1994), p. 241.

¹²⁴ Lettera di Wiener a Epstein, 2 agosto 1957, citato in Heims (1993), p. 12.

the clever use of statistical principles and the calculus of variations, and you have only the new application of a prior art, which itself is scarcely an art of invention» [p. 119].¹²⁵

È molto probabile in effetti che Wiener riflettesse su alcuni retroscena brevettuali relativi alla ricerca sui predittori. Occorre ricordare che, come teneva a ribadire Weaver (1977), Norbert Wiener non aveva condotto la ricerca in quanto membro della Sezione D-2: egli era stato l'aggiudicatario di un appalto, regolato da un contratto tra l'NDRC e la MIT Division of Industrial Cooperation (D.I.C.). Quest'ultima, che in seguito diverrà la Division of Sponsored Research (DSR),¹²⁶ era la struttura attraverso cui l'MIT attuava le proprie collaborazioni con compagnie esterne e, dal 1940, anche con il governo, quindi con l'NDRC, con l'NACA ecc.¹²⁷ Dalla fine del 1939 al 1955 la D.I.C. fu diretta da Nathaniel Sage senior che, secondo la testimonianza di Jay Forrester (1971), all'inizio della guerra aveva grande discrezionalità nel fissare le modalità dei contratti, anche nei confronti del governo, a prescindere dal Radiation Lab che era grande abbastanza da restare autonomo dal suo intervento. Sage, sempre secondo Forrester, fu molto attivo soprattutto nei confronti del neonato Servo Lab di Gordon Brown e dell'Instrumentation Lab di Charles S. Draper, nel Dipartimento di Ingegneria aeronautica, i quali trovarono in Sage un appoggio straordinario per tutto il periodo bellico.¹²⁸ Sage, come capo della D.I.C., curò per conto dell'MIT la stipula dei progetti riguardanti predittori di Draper e di Brown, oltre a quelli di Wiener.

Sono stati pubblicati lunghi stralci di due lettere di Brown a Sage risalenti al periodo in cui il progetto di Wiener era sotto approvazione da parte dell'NDRC: in essi si parla di uno stratagemma legale per considerare le ricerche di Wiener solo come "scienza pura", quindi come materia non brevettabile. Il 18 dicembre 1940, Brown scrive a Sage della necessità di separare «*the fundamental work*» di Wiener, che apparteneva all'NDRC, dal proprio *practical work*, appartenente alla Sperry. Egli ribadiva che:

«Dr. Wiener is an authority on many aspects of the branch of mathematics that is related to this work. However, he is but meagerly informed on the techniques necessary to reduce to practice the matters which he can express mathematically. He is also but meagerly informed on the specific limits which must be met when the results of a mathematical investigation are reduced to practice».¹²⁹

Nel 1940 A. C. Hall, appartenente all'allora nascente Servo Lab di Brown, aveva cominciato a lavorare su reti anticipatrici costituite da cascate di circuiti passivi, simili a quelle sottoposte a prova da Wiener insieme a Caldwell sull'analizzatore differenziale.¹³⁰ Nel progetto inviato all'NDRC, Hall riconosceva che lo schema era stato proposto da Wiener, Caldwell e

¹²⁵ Cfr. Su questo specifico aspetto della legge di natura non brevettabile anche Wiener (1993), p. 164. Tutto il cap. 10 di quest'ultimo libro è dedicato al sistema dei brevetti negli Stati Uniti.

¹²⁶ Prima di Sage la D.I.C. era stata diretta da Charles L. Norton, dal 1921 al giorno della morte di Sage, l'8 settembre 1939; cfr. [MIT Norton]. La DSR nacque nel 1955 sotto la direzione di Nathaniel Sage, mentre la DIC restò in vita sotto la direzione di F. Leroy Foster, che ne aveva avuto la vicedirezione dal 1939 al 1955. Alla morte di Sage, nel 1956 Foster divenne direttore della DSR e la DIC fu assorbita nella DSR. Cfr. [MIT 2002a] e [MIT 2002b].

¹²⁷ Jay Forrester ha raccontato che «Nat Sage set the pattern for the country in contracting between the government and the university» [Forrester 1971]. Sulle attività della D.I.C. prima della guerra cfr. Lécuyer (1998). Su quelle successive Dennis (1994). Cfr. anche Compton (1945). Quest'ultimo documento, sebbene riporti nel titolo solo gli ultimi due anni, contiene anche una sintesi delle attività svolte dall'MIT nel corso dell'intero quinquennio 1940-1945.

¹²⁸ Duffy, biografo di Draper, aggiunge a quanto dice Forrester che «The MIT administration vacillated in its support [to Draper's laboratory]. One tower of strength early on was Nathaniel Sage, director of MIT's Division of Industrial Cooperation, who encouraged Draper during the tough early years of the Instrumentation Laboratory's formation and growth. Sage fought Draper's battles at the top» [Duffy, p. 150].

¹²⁹ Lettera di Brown a Sage, 18 Dicembre 1940, OSRD7 GP, box 4, project file 6. Cito da Mindell (2002), nota 2, p. 383.

¹³⁰ Cfr. Bennett (1994, pp. 60-61 e nota 10); Bennett (1993, p. 172 e nota 30 p. 183).

Taylor, ma nella lettera di Brown che accompagna il progetto il ruolo di queste persone era minimizzato.

Sul finire del 1940 il neonato Servo Lab dell'MIT di Brown stava avviando un progetto in accordo con l'Instrument Laboratory di Draper del Dipartimento di Ingegneria Aeronautica dell'MIT, per conto della Sperry Corporation, finalizzato alla creazione di torrette da installare su navi, aerei e carri armati, quindi con commesse per tutte le forze armate,¹³¹ utilizzando mitragliere e cannoncini, e naturalmente fornite di predittori di breve e medio raggio. Al contrario, il progetto dei BTL era per un cannoncino da 90 mm, di un calibro dunque adatto al tiro verso aerei d'alta quota [cfr. Wildes e Lindgren 1985, p. 184]. Il rapporto contrattuale tra la Sperry e la D.I.C. durò fino a tutto il 1942 [cfr. Mindell 2002, pp. 212-3]. Per capire la portata dell'affare occorre considerare che alla fine della guerra del solo predittore di Draper, il "Draper Computing Gun Sight", installabile su carri armati ed aerei, furono prodotti 85.000 pezzi, da parte della Sperry e della Crosley [cfr. Compton 1945, pp. 17-18].

Ora, le idee sulla previsione che erano state avanzate da Wiener nel corso del convegno del novembre 1940 sui servomeccanismi potevano essere applicate al breve, medio e lungo raggio. Caldwell notò una sostanziale somiglianza tra il progetto di Gordon Brown e quello di Wiener: l'unica differenza stava nella lunghezza dell'anticipo, piccola nel primo caso, grande nel secondo.¹³² Tuttavia il progetto di Wiener fu forzatamente ristretto alla sola previsione d'alta quota per pezzi di grosso calibro.¹³³

In un'altra lettera, del 9 dicembre 1940, Brown scriveva ancora a Sage, e per conoscenza a Hazen e Caldwell, premettendo che

«The servomechanisms group has known for a long while that one of its most important projects was the analysis and investigation of circuits and mechanisms that would provide a 'lead', or establish a rate or a derivative of a function, or in other words make available means to anticipate the future value of some quantity or function».¹³⁴ Ribadiva poi che, comunque, essendo Wiener un matematico, «is but meagrely informed on the techniques necessary to reduce to practice the [mathematics]» e che «since mathematical analyses are not viewed as patentable material [...] If any of Dr. Wiener's efforts are reduced to practice in the field of servomechanisms while Wiener is collaborating with me [...] all patents should become the property of the body supporting the particular servomechanisms project».¹³⁵

Brown aggiungeva comunque di desiderare, tuttavia, di non essere escluso dall'accesso alle ricerche di Wiener: «I believe that the servomechanisms group has real justification for working with Dr. Wiener and for being allowed to use freely the results of the joint work».¹³⁶

Se guardiamo al resoconto finale sulle attività della Divisione 7, ci si rende conto che il consiglio di Gordon Brown fu seguito alla lettera: la ricerca di Wiener non figura tra i progetti applicativi, ma viene considerata essenzialmente come un paragrafo dei "Mathematical analysis of fire-control problems".¹³⁷ Quanto essa fosse stata importante lo dimostra il fatto che tutta la seconda metà del volume è occupata da un saggio a firma di Blackman, Bode e

¹³¹ Cfr. Bennett (1993, p. 140); Mindell (2002, cap. 6, pp. 175-184, e cap. 8 pp. 207-230).

¹³² *Caldwell's Proposal to Section D2*, come citato da Bennett (1994), pp. 60-1. Cfr. anche Bennett (1993), p. 172 e nota 30 p. 183.

¹³³ Cfr. *Wiener's Final report*, p. 1 e soprattutto p. 7 dove afferma: «the large-caliber AA weapons, to which I have been asked to confine my report».

¹³⁴ Lettera di Brown a Sage e p. c. a Hazen e Caldwell, 9 dicembre 1940, cito da Bennett (1993, p. 173 e nota 32 p. 183).

¹³⁵ *Ivi*.

¹³⁶ Lettera di Brown a Nathaniel Sage e per conoscenza a Hazen e Caldwell, 9 Dicembre 1940, cito da Bennett (1993, p. 173 e nota 32 p. 183).

¹³⁷ Cfr. *Summary Report of the Division 7 vol. I*, pp. 55-6.

Shannon, per conto dei BTL, su *Data smoothing and prediction in fire-control systems*,¹³⁸ che è in gran parte una rielaborazione delle idee delle *Yellow peril*.

Strategie industriali e destini individuali

Gli attori della Cibernetica *in fieri* come Wiener e Bigelow non erano inseriti, almeno scientemente, in un progetto industriale, né svolgevano un gioco di squadra all'interno delle compagnie, gli interessi delle quali non è detto che fossero sempre convergenti tra loro. Quel che dal punto di vista di Wiener non era altro che il primo passo verso la conquista di una nuova scienza, cioè l'intuizione che i servomeccanismi possono essere trattati dall'ingegneria delle comunicazioni, dal punto di vista delle compagnie private coinvolte nei predittori poteva essere una fonte o di nuovi profitti o di grosse grane. L'AT&T, di cui i BTL costituivano il braccio *R&D*, era tradizionalmente impegnata nelle telecomunicazioni. Le ricerche sull'M-9, il clone elettrico del predittore meccanico della Sperry Corporation, avrebbero potuto legittimamente essere interpretate dalla Sperry come una pericolosa intrusione in un campo di sua tradizionale pertinenza.

Nessuno, per quel che mi risulti, ha mai fatto considerazioni di questo tipo e perciò nessuno è andato a cercare documenti relativi a questo aspetto; dunque non posso dire nulla che non suoni più di una ragionevole congettura degna di una futura verifica. A questo livello congetturale si può pensare che il progetto di ricerca di Draper e di Brown possa essere stato una contromossa della Sperry, rispetto all'intrusione dell'AT&T. Sappiamo per certo che la Sperry si diede un gran da fare per accaparrarsi la collaborazione di Brown, che inizialmente aveva intenzione di collaborare con la General Electric.¹³⁹ Dal canto suo, la sezione D-2 dell'NDRC sembrerebbe aver cercato di accontentare entrambe le compagnie interessate,¹⁴⁰ attraverso la decisione di attribuire ai primi le ricerche sulla previsione sul lungo raggio (l'alta quota) e ai secondi quelle per il breve e medio raggio.¹⁴¹

Qual era però il ruolo di Wiener in questo contesto? Non era stato collocato in una posizione gerarchica elevata all'interno della piramide dell'NDRC, anzi era completamente esterno ad essa e gli era stato imposto di mantenere il segreto, dunque nemmeno poteva chiedere consiglio ad amici. Sebbene la sua indole lo abbia condotto a parlare un po' troppo delle proprie ricerche – cosa di cui si autoincolperà in seguito – è certo che ebbe uno scarsissimo accesso alle informazioni altrui, e neppure ebbe la possibilità di sapere cosa si decideva al di sopra di lui [cfr. Wiener 1956, p. 272].

Al contrario, i BTL potevano sapere tutto di ciò che faceva Wiener. Non dimentichiamo che Fry, vale a dire il direttore del dipartimento per le ricerche matematiche dei BTL, era anche il vicepresidente della Sezione D-2, e che all'indomani del convegno ai BTL un uomo di Fry, Stibitz, era divenuto supervisore della ricerca di Wiener. In pratica sembrerebbe dunque che Wiener, a sua insaputa, sia stato utilizzato come battitore libero, informalmente al servizio del progetto sui predittori dei BTL, i quali non avevano alcuna intenzione però che egli giungesse alla fase dello sviluppo prevista nel progetto iniziale approvato dall'NDRC.

¹³⁸ Cfr. *Summary Technical Report of the Division 7 vol. 1*, pp. 71-159.

¹³⁹ Mindell (1996) scrive che: «Sperry had become interested in Brown's work through Draper, and the company aggressively courted him when Brown expressed interest in working with General Electric. [...] Brown's original NDRC proposal, in fact closely follows Sperry Gyroscope's own research agenda at the time». [p. 346.]

¹⁴⁰ Dopo la sua costituzione nel settembre 1940, la D-2 aveva avviato subito consultazioni con alcuni enti militari come l'Aberdeen Proving Ground dell'Esercito, il Coastal Artillery Board, il Naval Gun Factory, il Naval Research Lab, ma anche con l'RCA, i BTL e la Sperry Corporation. Cfr. [Mindell 1995b].

¹⁴¹ Cfr. *Caldwell's Proposal to Section D-2*, p. 2, come citato da Bennett (1994, pp. 60-61). Cfr. anche Bennett (1993, p. 172 e nota 30 p. 183).

È significativo che, contemporaneamente, ai laboratori dell'MIT legati agli interessi della Sperry Corporation furono centellinati i risultati delle ricerche di Wiener. Per esempio, nel 1941 Bigelow discusse in maniera non ufficiale con A. C. Hall delle teorie di Wiener, in vista di una buona teoria dei servomeccanismi sottoposti a rumore [cfr. Bennett 1994 p. 61]. Nel 1942 Hall si rivolse a Bigelow per avere una copia dello *Yellow peril*, e Bigelow, inviandogli in maniera poco ortodossa quella di sua proprietà, gli chiese per quale motivo non ne avesse ottenuta una copia ufficiale [cfr. *ivi*, p. 178 e nota 50 p. 184]. In ogni caso il Servo Lab continuò a basarsi sui vecchi metodi della risposta in transitorio fino alla fine del 1942, come ci informa Mindell.¹⁴² È vero che già nel dicembre 1941 un membro del Servo Lab, Herbert Harris, indicò in un rapporto la necessità di adottare l'approccio della risposta in frequenza degli ingegneri delle comunicazioni,¹⁴³ ma il metodo della risposta in frequenza nei servomeccanismi sarà sviluppato solo nel 1943 nella tesi di dottorato di Hall (1947) [cfr. Bennett 1993, pp. 140-143].

Wiener-Bigelow e gli amplificatori operazionali

C'è un'ultima questione relativa alla paternità intellettuale che merita di essere citata, perché in questo caso non c'era di mezzo solo scienza pura non brevettabile. Almeno un aspetto della ricerca ebbe un carattere eminentemente pratico. Wiener riteneva che avessero un grande valore alcuni espedienti tecnici scoperti da Bigelow, di cui dà conto nel *Final report*:

«Mr. Julian Bigelow [...] was able to show that circuits with any impedance characteristic realizable at all were realizable with the use only of amplifiers, capacities and resistances, completely ignoring the use of inductances. The inductances are well known to be the least satisfactory element of ordinary circuit design». [*Wiener's Final Report*, p. 3]

Utilizzare amplificatori al posto di dispositivi passivi costituisce una invenzione fondamentale che sta alla base della progettazione di quelli che, nell'immediato dopoguerra, vennero chiamati amplificatori operazionali. Bigelow in una intervista ha sostenuto:

«In that period of work, I also invented and built a variety of curved flight tracking computer which was built in our own laboratory by myself and three assistants, and which is described in an MIT Division of Industrial Cooperations memorandum of that time» [Bigelow 1971].

Nulla però fu brevettato. L'invenzione divenne oggetto di un lungo contenzioso tra George Philbrick della Foxboro Company e J. R. Ragazzini, capo del laboratorio di ingegneria elettrica della Columbia University, entrambi membri della Divisione 7.¹⁴⁴ Nel diario ufficiale di Philbrick si legge che il 20 luglio 1942 egli aveva avuto un incontro con Bigelow, dal quale aveva appreso alcune nuove idee che Philbrick incorporò nei suoi amplificatori operazionali.¹⁴⁵ Sembra anche che un metodo simile fosse stato usato per modificare l'M9 da parte dei BTL, i quali avevano chiesto subito il brevetto.¹⁴⁶ In effetti anche l'M9 rientra nell'itinerario di ricerca

¹⁴² Mindell ha dettagliatamente analizzato le ricerche condotte dal Servo Lab per conto della Sperry, per come emergono nel rapporto "Description and Operating Instructions of the Sperry MIT Automatic Remote Control System for the T-36 Gun Carriage," DIC Project 6041, 11 agosto 1942, ed altri simili documenti conservati in Servo Lab Papers, box, 2 folder 4. Cfr. Mindell (2002) 227-8 e nota 63, p. 374.

¹⁴³ Harris H., "The analysis and design of servomechanisms," OSRD Report no. 454, 1941. Citato da Bennett (1993) p. 141 e nota 37 p. 160.

¹⁴⁴ Cfr. l'organigramma finale nel *Summary Report of the Division 7 vol. 1*, pp. 168-169.

¹⁴⁵ George A. Philbrick "Diary", "Visit to J.H. Bigelow", 20 luglio 1942, (NARA). Citato da Bennett (1994 p. 61 e nota 22).

¹⁴⁶ US Patent 2,408,081; US Patent 2,401,779; Cfr. anche Jung (2005, cap. 8: "Op Amp History", spec. p. 777); cfr. inoltre un documento citato da Mindell (1995, p. 75 e nota 22), che rimanda a Karl D. Swartzel, Jr., aprile-giugno 1941. Notebook #17512, Project file 23140, AT&T. Il lavoro di Swartzel sarebbe stato preparato a sua volta da studi condotti ai BTL da Sidney Darlington, che avrebbe suggerito un circuito per un differenziatore

di Philbrick, che aveva chiesto la collaborazione di un dipendente di Ragazzini, il giovane ingegnere Loebe Julie,¹⁴⁷ al quale usualmente si tende ad attribuire gran parte del merito. In ogni caso l'esito finale fu l'articolo di Ragazzini *et al.* (1947), che viene considerato il riferimento classico sulla materia.¹⁴⁸ Tra coloro che riportano il contenzioso nessuno fa riferimento a Bigelow e men che meno a Wiener.

Le linee di faglia della Cibernetica

Di tutte le vicende a cui abbiamo accennato non sappiamo nulla da Wiener stesso, il quale nell'autobiografia del 1956, un racconto che risente purtroppo di forti autocensure anche sulla base di pressioni editoriali, ci dice soltanto:

«When I began to emerge from my sheltered life into the scientific confusion of wartime, I found that among those I was trusting were some who could not be held to any trust. I was badly disillusioned more than once, and it hurt» [Wiener 1956, p. 272].

Personalmente in passato ho interpretato questo passaggio in linea con la crisi di coscienza del 1945, che Wiener visse dopo le notizie di Hiroshima e Nagasaki, ma quel “more than once” ci autorizza a riferirlo a più episodi e molto probabilmente anche alle difficoltà emerse nel 1942.

Le vicende che ho qui ricostruito servono a spiegare il clima interiore che connotò la biografia di Wiener nei tre anni successivi in cui, sentendosi messo ai margini, con grande fatica continuò a coltivare le idee della Cibernetica *in fieri*. Questo già giustificherebbe la lunga digressione rappresentata dal presente capitolo. D'altro canto i fatti raccontati rimandano a mio parere ad una dimensione che va oltre la psicologia, il caso umano, per toccare questioni di sociologia della scoperta ed aspetti strettamente legati alla Cibernetica in quanto tale e a qualsiasi ricerca che si muova nel suo solco.

In effetti Wiener era un uomo psicologicamente fragile, come egli stesso ci racconta nel primo tomo dell'autobiografia, in cui ci narra la sua storia di ragazzo prodigio dall'infanzia negata. Si potrebbero elencare anche numerose testimonianze di contemporanei, anche molto più giovani, che incontrarono spesso in lui un genio indiscusso alla continua ricerca di rassicurazioni circa il proprio valore. Ma ciò che ci fa pensare che qui si tratti di questioni che travalicano la psicologia è il fatto che studiosi come John von Neumann, dalle spalle molto più solide, sia per personalità che per le istituzioni che aveva a disposizione per difenderlo, incontrarono analoghe difficoltà. È il caso della disputa sulla priorità che vide von Neumann alle prese con le pretese di Eckert e Mauchly. Scrive ad esempio Nancy Stern (1980):

«These conflicts were based, to a considerable degree, on differing institutional perspectives. Von Neumann viewed his own work as being academic and theoretical; his attitude conformed to a great extent to what I will refer to as an academic ideology common among pure scientists and mathematicians. This perspective came into direct conflict with Eckert and Mauchly's commercial interests, resulting in irreconcilable differences between them that contributed, in part, to the subsequent bifurcation of computer technology into an academically based sector and a commercially based one» [p. 349].

Vicende simili si ritrovano nella genesi dei primi computer inglesi, in particolare nella vicenda dell'ACE di Turing o del computer di Manchester.

elettrico al fine di determinare il tasso di variazione del segnale, nell'ambito del progetto di un amplificatore retroazionato.

¹⁴⁷ Loebe Julie sarebbe stato ingaggiato da Philbrick su un progetto per migliorare dell'M9, contro il desiderio di Ragazzini Cfr. [Jung 2005, p. 779].

¹⁴⁸ Vedi anche Lovell, “Continuous Electrical Computation,” Bell Laboratories Record 24 (no. 3) March 1947.

Qui passa una profonda linea di faglia costituita dal fatto che la Cibernetica è ineludibilmente il luogo di incontro e di scontro tra la cultura dell'ingegnere e quella dello scienziato; tra le esigenze e gli scopi della scoperta scientifica e gli interessi industriali.

Nel curriculum dell'ingegnere, per esempio, è normale trovare un elenco di brevetti, molto meno lo è - e a maggior ragione lo era nel 1940 - per un fisico, per non parlare di un matematico. In proposito viene in mente uno di quegli incontri domenicali che l'ex ministro Corbino usava tenere con il gruppo di via Panisperna a Roma per conoscerne gli avanzamenti. Nel 1934 chiese a Enrico Fermi e agli altri se avessero già brevettato la loro scoperta dei neutroni lenti, considerando le possibili applicazioni per produrre radionuclidi, ma Fermi - nonostante fosse uomo pratico - ed i suoi compagni caddero letteralmente dalle nuvole.¹⁴⁹ Occorre notare, a proposito di Orso Mario Corbino, che benché fosse anche lui un fisico, un fisico sperimentale, aveva una biografia squisitamente ingegneristica e manageriale, con una forte competenza proprio nel campo delle applicazioni in radiodiagnostica.¹⁵⁰

Nelle due culture è diverso, anzi opposto, il modo di attribuzione della paternità della scoperta/invenzione. È caratteristico il diverso valore che nei due ambiti professionali si dà al ruolo della "prima idea". Esemplificativa in tal senso è un'argomentazione proposta da Vannevar Bush circa la priorità dell'invenzione dell'analizzatore differenziale. Egli scrive di aver notato che in un libro di Tait era stato indicato

«come collegare un paio di integratori per risolvere una particolare equazione differenziale. Era Tait l'inventore? A quanto ne so, egli fu il primo a esprimere *l'idea fondamentale* che ne è alla base. Ma egli non descrisse come farlo o che cosa usare come integratore, e al suo tempo non era noto nessun integratore in grado di pilotarne un altro senza errori tali da esser fatali da un punto di vista pratico. Perciò mi inchino, in ritardo, a Tait, *ma non posso chiamarlo l'inventore, perché si suppone che gli inventori producano risultati funzionanti*» [Bush 1970].¹⁵¹

Il modo di ragionare di Bush è agli antipodi di quello che Wiener applicherà quando riconoscerà la priorità di Kolmogorov nella scoperta della Teoria della previsione delle serie stazionarie. Scrive Wiener nell'autobiografia:

«Kolmogoroff confined himself to discrete prediction, while I worked on prediction in a continuous time; Kolmogoroff did not discuss filters, or indeed anything concerning electrical engineering technique; anything and he had not given any way of realizing his predictors in the metal, or of applying them to anti-aircraft-fire control. Nevertheless, *all my really deep ideas were in Kolmogoroff's work before they were in my own*, although it took me some time to become aware of this» [Wiener 1956, p. 261. Il corsivo è mio].

Il riconoscimento della priorità di Kolmogorov nella scoperta era talmente importante per lui da citarlo nello stesso *Wiener's Final Report*, dove si legge che «the theory arising from these conclusions [the *Yellow Peril*] [...] is essentially similar to a method carried out somewhat earlier by Kolmogoroff in Russia but not known to the author until the pamphlet in question was well under way» [p. 3].¹⁵²

Per un ingegnere come Bush, le "idee fondamentali" non danno la priorità: contano solo i "risultati funzionanti"; per un matematico come Wiener invece sono le "idee realmente

¹⁴⁹ Il brevetto italiano riguardante il processo di produzione di sostanze radioattive artificiali mediante bombardamento con neutroni e l'aumento dell'efficienza di questo processo dovuto al rallentamento dei neutroni, è del 26 ottobre 1934 e fu esteso poi ad altri paesi [cfr. Battimelli e Paoloni s.d.].

¹⁵⁰ Agli inizi del secolo Corbino si era occupato della produzione di raggi X a fini diagnostici, durante la Prima guerra mondiale aveva partecipato all'Ufficio Invenzioni e Ricerche, era stato Ministro dei Lavori pubblici e poi dell'Economia nazionale, in seguito era divenuto presidente della Compagnia Generale di Elettricità e della Società Meridionale di Elettricità. Cfr. [Battimelli e Paoloni 2008].

¹⁵¹ Cito da Nyce e Kahn (1991, it. p. 153). Il corsivo è mio.

¹⁵² Troviamo il riconoscimento in molti altri luoghi, compreso *Cybernetics* [Wiener 1948, p. 11] e la "Preface" dello *Yellow Peril* [Wiener 1949, p. V].

profonde” a fare la differenza, non tanto le loro applicazioni in dispositivi funzionanti. Perciò Wiener rivendica di aver portato “bodily” tutta l’ingegneria dei servomeccanismi nell’ingegneria delle comunicazioni, fatto che desta stupore in Mindell (2002), il quale evidentemente condivide il punto di vista degli ingegneri. Curiosamente l’ingegnere di oggi riconosce a Wiener solo la paternità dei “filtri di Wiener-Kolmogorov”, espressione davvero impropria visto che Kolmogorov di filtri non aveva affatto parlato.

La Cibernetica dal punto di vista dello scienziato è appunto scienza, cioè un tentativo di conoscere il mondo; d’altro canto essa ha per oggetto principale le macchine. Sebbene vi sia anche una sua estensione allo studio del vivente, risulterà evidente al lettore che il discorso cibernetico fino ad ora ricostruito si ridurrebbe a ben poca cosa senza la teoria per l’analisi e la sintesi di servomeccanismi, predittori, telefoni, telegrafi e – come poi vedremo – computer. Proprio le teorie elaborate per tali congegni hanno permesso che emergesse la visione cibernetica, nonché la sua estensione a sistemi organizzati non artificiali, cioè agli esseri viventi. Tuttavia, le macchine sono da sempre il territorio elettivo dell’artigiano e dell’ingegnere i quali, operando in vista della produzione e del mercato, non possono prescindere dalle logiche industriali, intrinsecamente guidate dal principio della massimizzazione del profitto. D’altro canto, nell’ottica dell’ingegnere e della compagnia industriale, la Cibernetica può tendere ad essere semplicemente una raccolta di strumenti teorici per costruire altri dispositivi, mettendo in secondo piano la dimensione conoscitiva, ed addirittura la convenienza a riconoscersi come scienza. Nel libro postumo *Invention*, tornando sulla questione delle leggi di natura non brevettabili, Wiener pone un quesito di grande rilievo:

«Il problema della differenza tra un’invenzione e una legge di natura necessita di nuove leggi, e ancor più di un nuovo modo di pensare da parte delle autorità in materia di brevetti. Un lavoro mal fatto e incompleto può sembrare un’invenzione, mentre un’analisi più attenta può rivelare che si tratta essenzialmente di una legge di natura. *Può darsi pertanto che non convenga affatto a un inventore comprendere troppo bene la propria invenzione* e può darsi anche che egli, rendendosi pienamente conto che essa fa parte di una legge di natura di più ampia portata, ne perda i diritti relativi, poiché non è un’invenzione vera e propria» [Wiener 1993, it p. 164. Il corsivo è mio].

Nel caso specifico della Cibernetica, sorge il dubbio che non fosse affatto conveniente per i grandi centri di ricerca delle compagnie private, ma anche per le facoltà di ingegneria delle università, intendere la wieneriana “Communication engineering” come una scienza, invece che come una semplice raccolta di tecniche, mera ingegneria.

Si tratta di conflitti che non sono facilmente sanabili prescindendo da una intensa negoziazione dei significati, da un ripensamento di stili scientifici per alcuni versi opposti, da compromessi realistici tra fini della scienza e scopi dell’impresa industriale. D’altro canto, la Cibernetica resta un Giano bifronte, ineliminabilmente scienza e ingegneria, come lo è del resto la sua principale epitome, il computer: connubio di logica ed elettronica.

Il pioniere e lo sviluppatore

La Cibernetica storica è stata anche il luogo di scontro di due concezioni dell’organizzazione della scienza: da un lato, il *modus operandi* libero dello scienziato più o meno solitario, intuitivo, creativo, spesso dotato di una conoscenza vasta del proprio campo, ma anche della capacità di uscire prudentemente da esso per collaborare con colleghi di altri campi. Probabilmente questa situazione non è tipica dei soli protagonisti della Cibernetica storica, ma è certo che la ritroviamo esemplificata in maniera spiccata da alcuni di essi: non solo Norbert Wiener, ma anche John von Neumann, Alan Turing, Walter Pitts e, pur seppur meno attrezzati in matematica, Warren McCulloch e Gregory Bateson, tutti scienziati che incarnarono questa figura di scienziato, forse più tipica del periodo anteguerra che del

dopoguerra. Accanto ad essi, c'è l'attività di figure semi-anonime, che lavorarono in gruppi ampi, spesso all'interno dei laboratori delle grandi imprese e delle loro logiche. Ad essi è dovuta la sistemazione del campo, sono essi che scrivono i manuali, e che dunque fissano i paradigmi *à la* Kuhn.

Nelle pagine di Wiener ritroviamo molto spesso questa distinzione tra lo "scienziato puro" e lo "sviluppatore" o il "progettista". Essa torna nell'espressione del suo ideale di scienza, inserita in un questionario che nel 1940 Bush aveva fatto circolare tra gli scienziati in vista delle attività dell'NDRC. Come ci informa l'autobiografia aveva sostenuto di essere

«strongly in favor of a scientific collaboration which would cross the frontiers between one science and another, and which should at the same time be voluntary, thus preserving a large measure of the scientists' initiative and individual responsibility. I distrusted all plans that might depend on a high degree of subordination of individuals to a completely authoritative setup from above, which would assign each man the narrow frame within which he was to work. I suggested therefore the organization of small mobile teams of scientists from different fields, which would make joint attacks on their problems. When they had accomplished something, I planned that they should pass their work over to a development group and go on in a body to the next problem on the basis of the scientific experience and the experience in collaboration which they had already acquired» [Wiener 1956, pp. 231-2].

L'idea di una piccola *task-force*, formata da menti eccellenti provenienti da diversi settori disciplinari, che lavorasse su base volontaria in maniera sostanzialmente indipendente, e che giungesse a risultati profondi, da passare poi a gruppi di sviluppatori, era tagliata su misura sul personale stile di ricerca di Wiener, e occorre riconoscere che, almeno fino all'invio del *Final Report*, egli riuscì effettivamente a muoversi più o meno secondo questo ideale.

Conclusa la ricerca sui predittori, tuttavia, Wiener non trovò più alcun progetto analogo. D'altro canto l'organizzazione stessa della scienza americana nel frattempo era andata mutando profondamente rispetto al 1940.

Cibernetica e contesto socio-tecnico

Alla luce di ciò che emerge dal lavoro degli "sviluppatori" si può pensare che esso sia d'altro canto il portato naturale del contesto. Riflettiamo ad esempio sulla situazione che si era venuta a creare entro una postazione di tiro antiaereo.

Essa includeva: 1) dispositivi di rilevamento, che inizialmente erano ottici e potevano essere costituiti da telescopi e fari riflettori, guidati a mano verso l'obiettivo su cui sparare; 2) un dispositivo di previsione, che era un calcolatore inizialmente analogico meccanico e del quale durante la guerra saranno sviluppate versioni elettriche analogiche, ma anche versioni elettroniche digitali (in particolare quella sviluppata dalla RCA tra 1940 e 1941); 3) dispositivi di comando delle mitragliere o dei cannoni, munite di servomeccanismi guidati dai segnali provenienti dal predittore. Specialmente i punti 1) e 2) richiedevano un ulteriore elemento, cioè, 4) gli operatori addetti all'inserimento dei dati e, volendo, anche il pilota dell'aereo nemico. Se aggiungiamo a tutto ciò il fatto che intorno al 1941 si iniziarono ad utilizzare allo scopo del rilevamento anche i radar, cioè dispositivi basati su tecnologie radio, si comprende come una centrale automatica di tiro ponesse quasi automaticamente il problema di integrare le tecnologie delle telecomunicazioni, del calcolo, dei controlli automatici, nonché l'interazione uomo-macchina, vale a dire che ponesse un problema di "control and communication, in the animal and the machine", dunque un problema "cibernetico" per antonomasia, stando alla futura definizione wieneriana di Cibernetica.

Qualcosa di simile ce la dice lo stesso Wiener nel manoscritto sul *Muscular Clonus*, scrivendo:

«During this war it also become apparent that in a large variety of pieces of apparatus, human messages and automatically produced messages, human effectors, and mechanical effectors, were to be used in the same piece of apparatus. The gun chaser is more or less interchangeable with a radar or photoelectric pickup for the purpose of holding a gun on the target. The crank worked by the gun-pointer may be replaced by an electric motor actuated by an amplified message coming in through a radar pickup. Thus, no thoroughly complete theory of communication and control engineering is possible which does not contain the theory of the human being as an element in the communication and control chain. While this idea was certainly not confined to any one group of authors, one of the first explicit statements of that point of view was a paper by Rosenblueth, Wiener, and Bigelow in 1943» [Wiener 1985c, p. 489].

Wiener dimostra qui una grande onestà intellettuale. In ogni caso, probabilmente il contesto socio-tecnico in cui ci si trovava ad operare ha favorito la diffusione delle idee cibernetiche; d'altro canto non è detto che il tecnico e lo scienziato attivo nel grande centro di ricerca sarebbero stati in grado di cogliere in tutta l'ampiezza lo spirito della Cibernetica *in nuce*.¹⁵³

Non è scontato che questo modello della scoperta "a due tempi" sia generalizzabile tanto da farne una ricetta valida per tutte le stagioni. Per esempio, richiederebbe una riflessione approfondita il caso del Progetto Manhattan ed in particolare delle ricerche condotte a Los Alamos, dove per motivi di tempo sembrerebbe che le due fasi siano state come integrate in una sola, e dove le attività di geni assoluti e dotati di uno sguardo scientifico multiforme come John von Neumann si sono dovute intrecciare necessariamente con quelle degli "sviluppati".

Certamente il modello a "due tempi" calza nel caso di Wiener, e certamente riguardo alle sue ricerche durante la Seconda guerra mondiale, rappresentate in primo luogo da quelle sulla previsione e il filtraggio, condotte tra la fine del 1940 e la fine del 1942.

Per esempio, non era detto che si guardasse in maniera naturale al radar come ad una materia da trattare mediante le tecniche analitiche delle telecomunicazioni *à la* Heaviside ed in generale di ciò che chiamiamo oggi elettronica. Wiener dovette discutere non poco con i dirigenti del Radiation Lab sull'utilità di adottare in quel contesto queste tecniche analitiche. Nel 1942 egli protestò con E. L. Bowles, capo del "microwave systems group" dei Radiation Lab [Lewis 1991], contestando la scelta del laboratorio di assumere fisici teorici di grande valore (provenienti in gran parte dall'esperienza con gli acceleratori di protoni di Lawrence), ma che erano a digiuno delle tecniche della «*communication engineering*». Gli scriveva Wiener:

«New members of the staff of your Laboratory are recruited from the theoretical physicists or mathematicians of the country, or indeed anywhere except from among the ranks of communication engineers in the strictest and narrowest sense of the term. [...] It [noise suppression, operational notation, and circuit theory] is not something which a quantum physicist has any reason to know the slightest thing about, and to turn such an individual loose in your laboratory without special training, no matter what a big shot he may be in his own subject, is like ordering a corn-doctor to amputate a leg. Better three weeks delay while the big shot is learning his new trade than three months of puerilities and blunders.»¹⁵⁴

La tendenza a ridurre il radar ad una questione essenzialmente di fisica ricorda la vicenda dell'effetto termoionico, per il quale si impiegarono circa cinquant'anni prima che si scoprisse che poteva essere utile per costruire diodi e amplificatori.

¹⁵³ Mindell (2002), secondo un punto di vista già evidente nella sua dissertazione dottorale (1996), sostiene che per quanto riguarda la ricostruzione delle vicende della Cibernetica, Wiener avrebbe proposto «a classic foundation myth of science and technology», consistente nella credenza che alcuni geni, scienziati e matematici produrrebbero le grandi idee, lasciando poi ad altri, di solito ingegneri, il solo compito di metterle in pratica. [Cfr. Mindell (2002), tutta l'"Introduction", pp. 2-17, ma spec. p. 5. E poi naturalmente un po' ovunque nel libro].

¹⁵⁴ Lettera di Wiener a E. L. Bowles, 22 Mar. 1942, box 2, folder 62, WAMIT. Cito da Galison (1994), pp. 240-1.

Forse, però, l'esempio più interessante è dato dal confronto tra le ricerche di Wiener-Bigelow – dal costo di complessivi 30.000 dollari – con quelle dei BTL sul predittore M-9 da un milione di dollari. Fin dall'inizio Wiener assunse l'approccio frequentistico e statistico che estese progressivamente allo studio di tutti i componenti del suo sistema: servomeccanismi, esseri umani e radar. Fu questo approccio che gli permise di giungere ad una visione integrata di esso. Al contrario gli studiosi dei BTL, a causa del procedimento di previsione essenzialmente geometrico che avevano scelto, almeno finché non parlarono con Wiener, a metà del 1941, non ritenevano affatto interessante considerare le performance specifiche dei vari componenti del loro sistema.

Da un lato, non è detto che fisici o matematici, che hanno come scopo primo della propria attività la conoscenza della realtà, sarebbero riusciti a cogliere la nuova visione imbossolata all'interno della "communication engineering" del tempo. Dall'altro non è detto che ingegneri e scienziati applicati la cui attività ha lo scopo di realizzare dispositivi, abbiano insieme anche la mentalità dello scienziato che comprende che i dispositivi custodiscono dei segreti su cosa sia la realtà. In aggiunta, studiosi con una mentalità applicativa e per di più alle dipendenze di gruppi industriali con interessi naturalmente rivolti alla realizzazione di dispositivi tecnologici, non sono nemmeno motivati a far passare le loro invenzioni per "scienza", rendendole non brevettabili.

Il passaggio dall'NDRC all'OSRD

Un ordine esecutivo di Roosevelt del 28 giugno 1941 riformò l'NDRC, che insieme ad altri due comitati (tra cui quello sulle ricerche mediche a fini militari, il Committee on Medical Research, CMR), fu inglobato in una struttura più vasta, l'OSRD (Office of Scientific Research and Development), di cui Bush divenne presidente, mentre la presidenza dell'NDRC passò al rettore di Harvard, James B. Conant. Venne anche costituito un Advisory Council del presidente, composto da coloro che erano posti a capo di OSRD, NACA, NDRC, CMR, più un rappresentante dell'Esercito e uno della Marina [cfr. *Roosevelt 1941*].

La struttura organizzativa della scienza statunitense ne risultò profondamente rimodellata. Furono introdotte 19 divisioni. La Sezione D-1 divenne Divisione 14 (radar), sempre sotto la direzione di Loomis e sempre coincidente nella sostanza con l'MIT Radiation Lab. La D-2 divenne Divisione 7, continuando a occuparsi del controllo del tiro, con a capo Harold Hazen,¹⁵⁵ direttore del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'MIT, che aveva coperto un *interim* alla direzione del Servo Lab. La Divisione 7 continuò a lavorare tramite appalti esterni, ma furono assegnati incarichi di direzione ad alti dirigenti dei reparti R&S di molte delle compagnie industriali interessate. Per citare solo coloro che furono posti a dirigere alcune delle sezioni (in cui a sua volta la divisione era articolata) si possono citare: Duncan J. Stewart della Barber Coleman Company (direttore della Sezione 7.1);¹⁵⁶ Preston R. Bassett della Sperry Corporation¹⁵⁷ e Tornton Fry dei BTL (co-direttori della Sezione 7.4). Ebbero incarichi governativi nella Divisione anche alcuni studiosi dell'MIT: Gordon Brown, Charles S. Draper, e Ivan A. Getting.¹⁵⁸

In generale questa nuova fase fu caratterizzata da una maggiore presenza delle compagnie e dei loro laboratori di ricerca in seno all'ente che rappresentava il governo, con una

¹⁵⁵ Per il contributo di Hazen ai controlli automatici vedi Bennett (1985).

¹⁵⁶ Manager della Divisione Elettrica della Barber Coleman Company dal 1932-1943, poi Vice-Presidente e General Manager dal 1943 in poi. Cfr. <http://www.engr.wisc.edu/eday/eday1950.html>.

¹⁵⁷ Era "vice-president in charge of Engineering" dal 1932, general manager dal 1944 e presidente dal 1945. Cfr. http://en.wikipedia.org/wiki/Preston_Bassett

¹⁵⁸ Cfr. *Summary Report of the Division 7, vol. I*.

relativizzazione del peso dell'AT&T, non nel senso di una diminuzione del suo coinvolgimento in termini assoluti, ma a motivo dell'aumento smisurato del volume dei finanziamenti da distribuire. Contemporaneamente vi fu un ingresso massiccio di altre università oltre a quelle inizialmente coinvolte. Ciò avvenne anche in coincidenza con l'entrata in guerra degli Stati Uniti, l'8 dicembre del 1941, il giorno dopo Pearl Harbour, che indusse un incremento formidabile degli stanziamenti governativi verso l'NDRC: durante il primo anno di attività l'NDRC aveva speso poco più di 6 milioni di dollari, mentre ne spese circa 150 l'anno nel triennio 1943-45 [cfr. Stewart 1948, p. 322].

Il 9 dicembre 1942 fu anche creata una nuova entità, l'Applied Mathematics Panel (AMP), per coordinare i matematici al servizio delle diverse divisioni. A dirigerla fu posto Warren Weaver, con la Dr.ssa Mina Rees come valido capo aiuto tecnico [cfr. Wildes e Lindgren 1985, p. 185].¹⁵⁹ Weaver mantenne comunque un posto alla Divisione 7. Il 18 settembre 1943 venne creato anche un Applied Psychology Panel [cfr. Stewart 1948, pp. 84-97].

Il cambio organizzativo dall'NDRC all'OSRD segnò il passaggio da una fase più libera e fluida ad una in cui la ricerca divenne ancor più definita e applicativa. Se da un lato le ricerche condotte dall'OSRD sarebbero state più varie e meno legate alla rigida filosofia antiaerea dell'NDRC prima maniera, esse mostreranno una natura ancor più settorializzata.

Le conseguenze della riorganizzazione sulle ricerche di Wiener

Questa riorganizzazione ebbe notevoli conseguenze su Wiener. Per quel che se ne sa non gli fu più chiesto di lavorare per la Divisione 7, né per il Radiation Lab. Fu assegnato all'Applied Mathematics Panel, dove gli venne chiesto di svolgere compiti specifici, cosa che non rientrava per nulla nel suo modo di fare ricerca, che tendeva a seguire un suo personalissimo filo conduttore.

Weaver e Wiener avevano tra l'altro ideali di politica della scienza diametralmente opposti e non potevano non sorgere conflitti. Abbiamo già visto dall'appunto del diario di Weaver del settembre 1942 che questi non condivideva lo stile troppo personale di Wiener, che considerava ingenuo e insubordinato. Nel marzo 1942 vi fu uno screzio per uno specifico problema matematico che Weaver aveva affidato a Wiener. Il primo commentava in quei giorni che Wiener

«had not been doing any of the things we particularly wanted him to do and that his business consisted of “holding myself in readiness in case other jobs turned up”».¹⁶⁰

In una lettera a Marshall H. Stone della fine del 1943 Weaver spiegò qual era il tipo d'uomo che avrebbe voluto per l'AMP: accomodante con i militari, aggiornato sugli sviluppi degli armamenti, tollerante, cooperativo e altruista, uno insomma che sapesse giocare in squadra e che non fosse convinto che le sue idee fossero «transmitted to him by Almighty God».¹⁶¹ Weaver era costretto a riconoscere che

«it is unfortunately true that these conditions exclude a good many mathematicians, the dreamy moonchildren, the prima donnas, the a-social geniuses. Many of them are ornaments of a peaceful civilization; some of them are very good or even great mathematicians, but they are certainly a severe pain in the neck in this kind of situation».¹⁶²

¹⁵⁹ Sulla storia dell'AMP vedi Owens (1988).

¹⁶⁰ Lettera di Weaver a Boyce, 24 Mar. 1942, Record Group 227, OSRD, Division 7, General Project Files, 1940-46, General Mathematical Theory of Prediction and Application, MIT, Wiener, NDCrc-83, NA-LC. Cito da Galison (1994), p. 241.

¹⁶¹ Lettera di Weaver a Stone, 6 dicembre 1943, cito da Owens (1988), p. 291.

¹⁶² Ivi.

Stone gli metteva però una pulce nell'orecchio: non sarebbe stato meglio che una buona organizzazione si adattasse agli individui migliori? ¹⁶³

Weaver non poteva non ammirare Wiener, e vedremo più avanti quali parole di stima avrà nei confronti delle sue idee circa il computer. Però Wiener incarnava perfettamente l'uomo che Weaver non avrebbe voluto nella sua squadra ed a cui avrebbe volentieri rinunciato se avesse potuto. Come Warren Weaver asserirà in una intervista, a suo parere Norbert Wiener

«was a genius, but he was not a good member of our group. He wouldn't work on things that we would ask him to do. Norbert simply wasn't a reasonable enough person, to play a useful role in general discussions». [Weaver 1977, cito da Hagemeyer 1979, p. 351].

Wiener non faceva un buon gioco di squadra. In questo fortunatamente era in buona compagnia, perché Weaver ebbe parole simili anche verso Merle A. Tuve [cfr. Weaver 1977], ¹⁶⁴ che aveva fatto la maggior parte del lavoro sulle spolette di prossimità, ricerca che rappresentava indiscutibilmente insieme a quella di Wiener il miglior risultato del primo anno di attività dell'NDRC.

Wiener aspettava una nuova ricerca da gestire a modo suo, invece fu inserito in un contesto come l'AMP, dove la sua situazione di dipendenza era istituzionalizzata. Le cose che aveva scoperto nel corso della ricerca sui predittori divennero materia del progettista e dello sviluppatore. Scrive nell'autobiografia: «As the war went on, the work left the hands of the *pure scientists* like myself for those of the *designers*, and I was at loose ends» [Wiener 1956, p. 276. Il corsivo è mio]. Aveva specificato in precedenza:

«Our ideas were eagerly taken up by other workers in the field and did lead to a very definite improvement in practice, in particular of the part that consisted in filtering out experimental errors of observation. We were not finally commissioned to perfect our own design [...]. My textbook [lo *Yellow peril*] was very freely used, not only during the war by the designers of systems of control for the aiming and firing of anti-aircraft guns, but also by servo-engineers and electrical-communication men, both then and later» [Wiener 1956, p. 255].

Così, alla fine del 1942, la guerra di Wiener era per molti versi finita e in fondo, come egli stesso aveva voluto, le sue idee passarono per il triennio seguente agli “sviluppatori” e dei “progettisti”.

Sullo *Yellow Peril* si lavorò a lungo per tradurlo in termini comprensibili agli ingegneri, per trarne applicazioni pratiche, e sistemare particolari matematici restati aperti. In una recensione, John Tukey - il matematico a cui si attribuisce l'introduzione della parola BIT - dice che durante il tempo di guerra circolarono almeno una dozzina di “simplifications” o “explanations” dello *Yellow peril* [cfr. Tukey 1952, p. 319]. Possiamo citare il commento, forse del marzo 1942, di Norman Levinson dell'MIT ed uno del 14 dicembre 1942 di Peter G. Bergman. Nel 1943 la ricerca di Wiener fu utilizzata da R. S. Phillips, che stava lavorando ai sistemi radar autoinseguenti e cercava criteri sulla cui base i servomeccanismi potessero essere progettati in maniera tale da minimizzare gli errori dovuti a rumore sull'input. ¹⁶⁵ Il 3 ottobre 1944 si tenne addirittura una “Conference on the methods of N. Wiener”. ¹⁶⁶

Nell'aprile 1943, Weaver aveva istituito un comitato interdisciplinare sui servomeccanismi e commissionò al matematico L. A. MacColl dei BTL la stesura di un rapporto per fare il punto sulle tecniche relative ai controlli automatici [cfr. Segal 2003, p. 101]. Ne emerse la

¹⁶³ Cfr. lettere di Stone a Weaver, 14 e 29 dicembre 1943, citate da Owens (1988), p. 292.

¹⁶⁴ Su Tuve cfr. Abelson (1996).

¹⁶⁵ R. S. Phillips “Servomechanism”, 11 maggio 1943, Rad. Lab. Report n. 372. Citato da Bennett (1994, p. 61).

¹⁶⁶ Cfr. “Report of conference on the methods of N. Wiener,” 3 ottobre 1944. Tra gli altri rapporti sulla predizione si possono citare P. G. Bergman, “Notes on the Extrapolation issued by NDRC,” 14 dicembre 1942; N. Levinson, “Prediction of Stationary Time Series by a Least Squares Procedure,” Marzo 1942 [Bennett 1994, p. 61 e nota 25].

monografia poi pubblicata nel 1945 dal titolo *Fundamental theory of servomechanisms* [MacColl 1945]. Nella prefazione al libro, Weaver scrive che esso rappresenta «a unified way for analyzing and designing a servomechanism», reso possibile dalla generalizzazione dei metodi dell'ingegneria delle comunicazioni [ivi, pp. XIV-XV]. Spiega ancora che era il frutto del passaggio da una concezione temporale dell'analisi dei servomeccanismi ad una concezione frequentistica, concezione quest'ultima già abbozzata da Nyquist nel 1928 e poi da Bode, ma che era divenuta una teoria scientifica generale dei servomeccanismi solo nel corso delle ricerche sul controllo antiaereo. Weaver non spende una sola parola per ricordare che era stato Wiener a proporre quello strano connubio. Nel maggio 1947 si tenne a Londra un "Congresso sui regolatori automatici ed i servomeccanismi" [Douch 1947], dove il generale Douch, presentando l'esperienza con l'M9, mostrò l'importanza delle tecniche delle comunicazioni per la teoria dei controlli. Mi soffermerò successivamente sugli sviluppi inglesi delle idee dello *Yellow Peril*, mostrando come non si possono considerare in alcun modo indipendenti da quelle americane.

La stessa teoria matematica della comunicazione di Shannon, in debito nei confronti di Wiener, può essere iscritta in questa svolta dal "pioniere" allo "sviluppatore". Wiener sarà spesso amareggiato dal fatto che le sue intuizioni non vennero riconosciute come desiderava. D'altro canto il lavoro dello "sviluppatore" può obliterare quello del pioniere; il sistematizzatore di una materia diviene il naturale riferimento per la comunità scientifica dei contemporanei e dei posteri; generalmente il suo lavoro si condensa in un manuale e i manuali sono l'ingrediente principale dei paradigmi, come ha ben colto Thomas Khun (1970, spec. p. 20). E tuttavia non si potranno cogliere la complessità, i nodi irrisolti, i temi trascurati, le visioni innovative, solo guardando alla sistemazione ben levigata degli anni della sistemazione.

APPENDICE I:1 - Generalità sui predittori e sul predittore della Sperry

È utile soffermarsi un po' più nel dettaglio sui predittori. A questi dispositivi è dedicato il secondo capitoletto del *Bush's Report for the First Year* di Bush, che segue quello sul radar. Bush articola il problema della contraerea in tre tipologie: 1) quello di "point-blank range", quando si tratta di sparare a vista e sono sufficienti proiettili traccianti, semmai con l'ausilio di semplici sistemi meccanici che permettono al puntatore umano di traguardare il bersaglio; 2) quello di "intermediate range", dove sistemi di tiro a ripetizione sono ancora utili, ma in cui la previsione automatica diviene necessaria; 3) il "long range fire", dove si utilizzano cannoni e la previsione è indispensabile, e "which is an advanced art", come scrive Bush con una consapevolezza del lavoro ancora da fare ma anche con un certo orgoglio per il lavoro svolto [cfr. p. 20]. A Wiener era stato chiesto di limitare il proprio studio al "long range fire".

Come Bush asserisce, gran parte dei predittori messi a punto dall'inizio delle attività dell'NDRC erano stati di tipo meccanico e ulteriori passi erano stati compiuti in tal senso. Per il breve raggio citava un sistema meccanico utile specialmente nelle torrette aeree, munito di giroscopio, con un asta che permetteva di traguardare il bersaglio; per il medio raggio il "Kerison director", che era l'analogo inglese dell'M4 della Sperry, di cui parleremo tra poco [ivi, p. 21]. La tecnologia meccanica, sosteneva Bush, era "costosa e difficile da produrre in quantità adeguata" specialmente per il lungo raggio; in questo caso quella elettrica sembrava offrire ancora una precisione sufficiente, a costi e carichi decrescenti [ivi, p. 23]. Inoltre si intravedevano preziose sinergie con le ricerche sul radar.¹⁶⁷

Il predittore più elaborato all'inizio della guerra, l'M-4 della Sperry Corporation, era un perfezionamento dell'"M-2 Director", che derivava a sua volta dallo Vickers-Kerison inglese. Come ci informa David Mindell, seguendo un libretto illustrativo del 1930 della Sperry Gyroscope,¹⁶⁸ l'M-2 era un computer analogico meccanico associato a quattro mitragliere antiaeree. Per gli aspetti strettamente balistici il sistema incorporava un equivalente meccanico delle classiche tavole balistiche, mentre per la previsione riceveva dati circa la posizione dell'aereo nemico mediante telescopi, con cui si seguiva manualmente l'obiettivo. I dati di input relativi alla posizione dell'aereo erano azimuth, elevazione e portata.¹⁶⁹ Il predittore invece produceva tre output: azimuth previsto, elevazione prevista, e tempo di volo del proiettile, in base alla portata prevista, necessario per calcolare il punto di incontro tra granata e aereo, nonché per predisporre il tempo di esplosione della spoletta a tempo della granata.

La previsione era data da una semplice estrapolazione lineare, calcolata sulla base del tasso di variazione delle coordinate e del tempo di volo del proiettile, ipotizzando una rotta rettilinea a quota costante dell'obiettivo. Tale metodo era detto "plan prediction method", perché trasformava provvisoriamente in coordinate cartesiane dati di input e output che invece erano in coordinate polari [cfr. Mindell 1995a, pp. 108-113]. Il sistema era comandato da un equipaggio numeroso, addetto all'immissione dei dati.¹⁷⁰ Nel passaggio dall'M-2 del 1930 all'M4 del 1939 la Sperry aveva soprattutto mirato a diminuire il numero di addetti, che alla fine erano divenuti due.

¹⁶⁷ Cfr. Ivi, p. 16. Stando almeno alle dettagliate descrizioni che Mindell ha dato del predittore elettrico dei BTL, allora – viene da chiedersi – perché i BTL puntarono a farne una semplice trasposizione elettrica del "Kerison director", cioè di un sistema che Bush classificava come adatto al medio raggio?

¹⁶⁸ La Sperry Gyroscope Company, fondata nel 1910, prenderà nel 1933 il nome di Sperry Corporation, e nel 1955 la Sperry Rand.

¹⁶⁹ L'Azimut è l'angolo orizzontale rispetto al Nord; l'Elevazione è la distanza verticale rispetto all'orizzonte; il Range o Portata è la distanza effettiva dell'obiettivo.

¹⁷⁰ Anche conosciuto come Kerrison, cfr. per esempio Bennett (1993), p. 169.

APPENDICE I:2 - Il primo progetto di Wiener sui predittori

In una lettera autografa ¹⁷¹ di Wiener a Bush si proponeva:

«To anticipate the future of a function is impossible without restrictions. The restrictions which make it approximately possible are that motions of high frequency or short period are neglected.

It is easy to consider the anticipation operator as a function of the frequency ω . It is $e^{ia\omega}$ a being the time of anticipation.

It cannot be approximated over $(-\infty, \infty)$ by a polynomial in operators of the form

$$\left(\frac{1+ai\lambda}{1+bi\lambda}\right)^n,$$

but it can be approximated in the least square sense over the range $(-\Omega, \Omega)$. The approximating polynomial may be realized by a Lee-Wiener network, or for large time lags, by an equivalent set-up of integrators. Other network syntheses may be used.

This method is preferable to a synthesis in terms of successive time derivatives, which on the frequency scale is equivalent to a power series development in ω . Such a development grossly exaggerates high frequencies, and is relatively inoperative for low frequencies. The synthesis we suggest is far closer to an extrapolation from values taken at time 0, -1, -2, etc., and automatically suppresses high frequencies. The higher derivatives are as hard to obtain and even more inaccurately given than the desired extrapolation itself».¹⁷²

Il ragionamento di Wiener segue in maniera stretta l'analogia con il procedimento utilizzato per il progetto dei "filtri d'onda" e che viene denominato "sintesi di reti". Un filtro d'onda ideale, ad esempio un filtro passa basso che abbia come output la forma perfetta di un segnale gradino, è irrealizzabile. Tuttavia esistono famiglie di filtri realizzabili (ad esempio nel caso del filtro di Butterworth) la cui funzione di trasferimento è caratterizzata da un polinomio, all'aumento del grado del quale l'approssimazione del filtro realizzabile migliora. La "sintesi di reti" permette di progettare degli assemblaggi di circuiti standard, che fino alla Seconda guerra mondiale erano unicamente passivi, mediante delle cascate di circuiti che si accrescono in maniera proporzionale al grado del filtro, dando luogo a filtri realizzabili con approssimazioni sempre migliori rispetto alla caratteristica desiderata. I filtri di Lee-Wiener erano nati proprio quando Wiener venne a conoscenza di questa metodica ed ebbe l'idea di utilizzare per essa le funzioni di Laguerre.¹⁷³

Il ragionamento di Wiener circa la previsione ricalca lo stesso metodo. Si consideri un circuito lineare con segnale di input $f(t)$ e di output $g(t)$, con amplificazione unitaria. Si desidera che l'output restituisca il valore dell'input con un anticipo temporale a . Avremo perciò la relazione:

$$g(t) = f(t + a)$$

¹⁷¹ La lettera è stata pubblicata in Bennett (1994), p. 58. Bennett scrive che si trova nell'archivio "Along with" la lettera di Wiener a Bush del 21 settembre 1940 che accompagnava il Memorandum sul computer digitale.

¹⁷² Lettera autografa di Norbert Wiener a Vannevar Bush del 21 settembre 1940, (NARA) (US National Archives and Records Services) Record Group 227, Records of the OSRD, Records of Div. 7, General Project Files Project #6, MIT Reports. Cito da Bennett (1994), pp. 58-9.

¹⁷³ La tesi per il Master di Lee, scritta sotto la guida di Wiener, aveva per titolo "Synthesis of Electric Networks by Means of the Fourier Transforms of Laguerre's Functions". Cfr. Therrien (2002), pp. 33-44. I filtri di Lee-Wiener rientrano nella più ampia classe dei filtri d'onda, come ad esempio i circuiti RLC o RC, che erano stati introdotti tra il 1915 e il 1930, e come tutti gli altri filtri inventati entro l'inizio della guerra erano solo passivi. Proprio nel corso della ricerca di Wiener, Bigelow propose di sostituire le indutanze con amplificatori. Vedi anche Bray (2002).

Passando alle trasformate di Fourier e applicando la proprietà di traslazione temporale si ottiene:

$$G(\omega) = e^{ia\omega} F(\omega)$$

dove $G(\omega)$ è la trasformata di Fourier dell'output e $F(\omega)$ quella dell'input. La funzione di trasferimento $H(\omega) = G(\omega)/F(\omega)$ del sistema è quindi data da:

$$H(\omega) = e^{ia\omega}$$

Come avviene nel caso dei filtri d'onda ideali, anche questa funzione viola il principio di causalità. In questo caso, ciò è evidente, come Wiener spiegherà plasticamente nell'autobiografia in quanto

«the main condition for physical reality which we must impose on an operator is that the output should involve only the past and present of the input. It will be seen that the problem of shooting ahead of an airplane demands that the realizable operator approximate the future position of the plane which could, in fact, be ascertained only by a non-realizable operator. Only a prophet with the knowledge of the mind of the aviator could predict the future position of an airplane with absolute certainty, but there are often enough, in fact, means which will allow one to accomplish the minor task of a quite correct prediction» [Wiener 1956, p. 241].

Così Wiener propone di cercare una funzione di trasferimento realizzabile che approssimi quella irrealizzabile. Ciò si può ottenere secondo la sua proposta mediante la sintesi di una rete mediante assemblaggi di filtri di Lee-Wiener oppure di integratori.¹⁷⁴ Come emerge chiaramente dalla lettera, l'impostazione di Wiener considerava implicitamente e risolveva alla radice i problemi che affliggevano il "Plan Prediction Method", basato su operazioni di derivazione, che amplificavano le frequenze alte e che avrebbero dato enormi grattacapi ai BTL quando ne tenteranno la realizzazione elettrica.

¹⁷⁴ Nella formulazione adottata conclusivamente nel *Final Report* Wiener propone una funzione polinomiale di forma un po' diversa Wiener, rispetto a quello della lettera e cioè: $((1 - \omega i \lambda / 2n) / (1 - \omega i \lambda / n))^2$, dove n il grado della funzione polinomiale approssimante e λ l'anticipo desiderato; cfr. *Wiener's Final Report*, p. 1.

PARTE II : Cibernetica e Computer

La parola “Cibernetica” - come d'altra parte i neologismi utilizzando il prefisso “cyber”, come *cyberspace*, *cyborg*, *cyberwar*, che sono indubbiamente equivalenti alle espressioni “spazio cibernetico”, “organismo cibernetico”, “guerra Cibernetica” - è intrinsecamente legata nell'immaginario collettivo contemporaneo al “computer”, termine con il quale qui indichiamo il calcolatore digitale, binario, elettronico, a programma interno, “general purpose”, anche detto ad “architettura von Neumann”, secondo una scelta terminologica a mio parere sostanzialmente condivisibile dal punto di vista storico. Nemmeno è fuori luogo l'associazione della Cibernetica allo studio del cervello paragonato al computer come “electronic brain”, espressione che negli anni Quaranta era usata non solo da giornalisti in cerca di sensazionalismi, ma anche da parte degli scienziati promotori delle idee cibernetiche.

Eppure, quando si pensa alla Cibernetica e sicuramente quando la mente va alla figura di Wiener, sembra avvenire una sorta di cortocircuito cognitivo, che fa sì che sembri più sensato associare la Cibernetica di Wiener ai controlli automatici e al *feedback* piuttosto che al computer.

Nella prima parte abbiamo visto come per Wiener fosse stato significativo il vedere emergere, attraverso le ricerche sulle centrali antiaeree ed in particolare sui predittori, la visione di una ingegneria delle comunicazioni generalizzata, in cui i metodi analitici dell'ingegneria delle comunicazioni venivano estesi allo studio dei sistemi di controllo e agli esseri umani; un'ingegneria delle comunicazioni che, a sua volta era inglobata in una teoria statistica che Wiener chiama “meccanica statistica Gibbsiana”.

Nel triennio 1943-'45 da queste idee, tutte presenti nello *Yellow peril*, scaturirono numerosi studi, spesso condotti in squadra, lavoro da cui nacque la teoria matematica delle comunicazioni di Shannon, la teoria classica dei controlli automatici per i sistemi lineari fissata da MacColl ed altri, e una ulteriore sistemazione della stessa teoria dei filtri di Wiener.

Nello stesso triennio Wiener, messo più o meno in disparte, continuò a lavorare sulla sua idea di ingegneria delle comunicazioni generalizzata e incentrata su una trattazione statistica del messaggio, in una parola “la Cibernetica”, idea che andò a costituire una visione di fondo per un programma di ricerca per il dopoguerra. In questa fase l'attenzione di Wiener e di un gruppo di persone che si era andato coagulando intorno a lui, fu presa dal problema del calcolo digitale veloce, e l'oggetto della Cibernetica *in fieri* si spostò prepotentemente verso il computer ed il suo parallelo fisiologico, il cervello. Vedremo in questa seconda parte come ciò sia avvenuto.

Capitolo 5. I calcolatori fino all'ENIAC

Le calcolatrici aritmetiche meccaniche

La storia del computer costituisce un ambito di studi vastissimo e certamente più noto di quello dei controlli automatici, perciò entreremo meno nei dettagli di essa. Tuttavia per rispondere ai nostri interrogativi dobbiamo aver chiaro quali siano stati i filoni tecnologici dai quali il computer scaturisce, approfondendo alcuni aspetti meno noti o che sembrano più rilevanti per la nostra ricerca.¹⁷⁵ Come noto le strategie di calcolo automatico o semiautomatico si suddividono in digitali e analogiche. Abbiamo già accennato a queste ultime nei capitoli precedenti e ci soffermeremo qui soprattutto su quelle digitali.

La storia del calcolo aritmetico automatico ha alcuni caratteri in comune con quella di regolatori e servomeccanismi. Essa affonda le sue radici nell'antichità classica ma macchine di calcolo vere e proprie compaiono solo con il Seicento e, comunque, analogamente a ciò che accade ai controlli automatici, la vera "epifania" di una scienza dei calcolatori si ebbe solo con la Seconda guerra mondiale, ed anche qui in associazione con la Cibernetica. C'è, però, una differenza importante da rilevare: il fatto, cioè, che i calcolatori meccanici non raggiunsero fino alla fine dell'Ottocento una diffusione commerciale anche lontanamente paragonabile a quella dei sistemi di controllo.

I principi di base per far compiere ad una sistema meccanico le quattro operazioni aritmetiche vennero introdotti nel Seicento. La tecnologia di base era quella di una successione di ruote a 10 posizioni; ognuna di queste ruote rappresentava rispettivamente unità, decine, centinaia ecc. in modo che un giro completo della ruota delle unità facesse scattare di un passo quella delle decine, ecc. A parte una rudimentale moltiplicatrice dello scozzese Nepero (1550-1617), ancora molto più simile ad un abaco,¹⁷⁶ gli storici sono concordi nel ritenere che la prima macchina calcolatrice vera e proprio fu l'"orologio calcolatore" del tedesco Wilhelm Schickard (1592-1635), astronomo e matematico amico di Keplero.¹⁷⁷ Su principi simili si basava anche la "pascalina", ultimata da Blaise Pascal nel 1642, in grado di eseguire addizioni e sottrazioni. Leibniz, come testimonia un saggio del 1685, la migliorò consentendole l'operazione di moltiplicazione con l'introduzione di dispositivi meccanici, che sarebbero stati utilizzati nelle calcolatrici commerciali dalla seconda metà dell'Ottocento in poi, come il "tamburo differenziato" o "ruota di Leibniz", e la ruota a denti retrattili, poi conosciuta poi come "ruota di Odhner".¹⁷⁸ Queste modalità costruttive restarono pressoché invariate fino alle calcolatrici da tavolo della prima metà del Novecento.

Anche nel caso delle macchine calcolatrici come per i servomeccanismi, è possibile vedere una distinzione tra "alimentazione" e "segnale", aspetto che è scarsamente evidenziato nelle storie dell'informatica. Anche qui si aveva una situazione simile a quella che si ha nei sistemi di controllo: in macchine come la pascalina, l'energia per azionare i ruotismi interni (alimentazione) era conferita manualmente dall'atto del far girare le ruote che la macchina

¹⁷⁵ Per gli aspetti generali, tra le innumerevoli storie del computer o dell'informatica, mi sono avvalso questo e il successivo capitolo delle seguenti opere: Martin (1925), Goldstine (1973), Williams (1985), Breton (1987), Pratt (1987), Ceruzzi (1998), Rojas (2000), Morelli (2001), Akera e Nebeker (2002), Bauer (2007). Ho anche fatto ricorso alle raccolte di fonti pubblicate da Smith (1929) e Randell (1982a).

¹⁷⁶ Breton (1987, it. p. 38; Pratt (1987) it. p. 62.

¹⁷⁷ Schickard, Lettera a Keplero, riportata in Freytag-Loringhoff (1957, pp. 25-8).

¹⁷⁸ Cfr. Pratt (1987, it. pp. 69, 70-4 e 124). Leibniz, in particolare, introdusse una ruota a denti retrattili per rappresentare il moltiplicando, che fu poi brevettata da W.T. Odhner nel 1891 e che acquistò un ruolo significativo nelle macchine commerciali di fine Ottocento.

possedeva per l'immissione dei numeri (segnale), ruote che erano simili al combinatore dell'apparecchio telefonico. In altri casi l'energia per digitare i numeri era distinta da quella usata per muovere i meccanismi interni, che veniva fornita mediante la rotazione di una leva azionata a mano oppure, dal primo Novecento e solo in taluni casi, per mezzo di un motore elettrico.

È interessante chiedersi quali fossero le esigenze che spingevano gli inventori di macchine da calcolo. Generalmente essi insistono sull'affrancamento dell'uomo da un lavoro noioso e ripetitivo. Scrive Nepero:

«Con le poche capacità e il poco talento che possiedo, ho sempre cercato di fare del mio meglio per diminuire le difficoltà e la prolissità dei calcoli, responsabili del tedio che allontana dagli studi matematici».¹⁷⁹

Il tedio del calcolo è richiamato anche da Leibniz nel manoscritto *Machina aritmetica*:

«Also the astronomers surely will not have to continue to exercise the patience which is required for computation. It is this that deters them from computing or correcting tables, from the construction of Ephemerides, from working on hypotheses, and from discussions of observations with each other. For it is unworthy of excellent men to lose hours like slaves in the labor of calculation, which could be safely relegated to anyone else if the machine were used.» [Cito da Smith (1929), p. 181]

Sottolineo di passaggio una opposizione che resta alla base di tutta la storia del computer, tra il calcolo “tedioso”, perché essenzialmente ripetitivo, da “schiavi”, e dunque affidabile ad una macchina; contrapposto ad una attività matematica e scientifica creativa, che d'altro canto Leibniz era tra i primi a desiderare fosse anch'essa meccanizzata.¹⁸⁰

Oltre che alle necessità degli scienziati, Leibniz pensava alle applicazioni commerciali, elencando in generale come possibili fruitori «all who are engaged in computations which, it is well known, are the managers of financial affairs, the administrators of others' estates, merchants, surveyors, geographers, navigators, astronomers, and [those connected with] any of the crafts that use mathematics.» [ivi, p. 180].

Questa esigenza tuttavia non fu decisiva per l'immediato per indurre a produrre in serie delle macchine calcolatrici commerciali, per le quali occorrerà aspettare la fine dell'800 quando iniziarono a diffondersi capillarmente calcolatrici commerciali, a buon mercato, dotate di leve manuali oppure azionate elettricamente, spesso usate semplicemente per la gestione delle casse dei negozi o per altri scopi contabili.¹⁸¹ Si deve considerare che le calcolatrici meccaniche non aumentavano di molto la velocità del calcolo manuale. Nel 1945 un contabile giapponese con l'abaco batté un esperto contabile statunitense dotato di calcolatrice da tavolo elettrica. Le esigenze espresse da Nepero e Leibniz si spiegavano soprattutto con la scarsità di persone in grado di svolgere calcoli aritmetici manuali nel loro tempo e la necessità di aumentare l'accuratezza del calcolo delle tavole [cfr. ancora Leibniz, *ivi*].

Sempre sul finire dell'Ottocento iniziarono ad affermarsi le tabulatrici a schede perforate per l'elaborazione di dati statistici. L'idea di registrare numeri e istruzioni mediante fori era stata introdotta da Babbage, che si era a sua volta ispirato al telaio automatico di Joseph-Marie Jacquard, inventato nel 1804 per controllare i disegni da eseguire nel corso della tessitura mediante schede.¹⁸² Tra le applicazioni che ebbero più successo sul piano mondiale fu quella dello statunitense Herman Hollerith, che creò tabulatrici a schede perforate di formato standard

¹⁷⁹ Nepero, *Rabdologia*, Lettera di dedica ad Alexander Seton, Edimburgo, 1617, p. 414. Cito da Williams (1985, p. 106).

¹⁸⁰ Cfr. per esempio Pratt (1987, it. pp. 89-101).

¹⁸¹ Cfr. Martin (1925); Breton (1987, pp. 65-6); Pratt (1987, pp. 122 e 124).

¹⁸² Cfr. ad esempio Pratt (1987, pp. 142-9).

per l'elaborazione di dati statistici e che furono usate a partire dal censimento della popolazione statunitense del 1890.¹⁸³ Nel 1896 Hollerith fondò la Tabulating Machine Company, che in seguito acquisì il nome di International Business Machines Corporation (IBM).¹⁸⁴

Il calcolo scientifico

Scrivendo ancora Leibniz in *Machina aritmetica*:

«But limiting ourselves to scientific uses, the old geometric and astronomic tables could be corrected and new ones constructed by the help of which we could measure all kinds of curves and figures» [Cito da Smith (1929), p. 180]

Una delle principali maniere con cui per millenni si è venuti incontro alle esigenze di calcolo è la consultazione di tavole: ne esistevano di numeriche, finanziarie, balistiche, astronomiche, nautiche, attuariali ecc. Questo metodo, in voga già in età antica in forma manoscritta, conobbe una netta espansione con l'introduzione della stampa. Tuttavia le tavole erano tormentate da errori di calcolo, a cui si aggiungevano quelli dei copisti ed in seguito dei tipografi. All'epoca dell'inglese Charles Babbage (1791-1871), il ricorso alla meccanizzazione guardava ancora essenzialmente alla possibilità di ridurre questi errori, piuttosto che alla possibilità di velocizzazione le procedure. Uno dei principali scopi dei progetti meccanici di Babbage, consisteva appunto nel trovare un metodo per la produzione di tavole scientifiche prive di errori, mediante due complessi progetti: quello per una Macchina alle Differenze [Difference Machine], e quello ancor più ambizioso per una Macchina Analitica [Analytical Engine]. L'intuizione che sta alla fonte di queste macchine, che Babbage non riuscì mai a costruire, è data dall'idea di concentrare nella macchina tutte le fasi di una computazione fino al risultato stampato, prescindendo dall'intervento umano. Se si aggiunge a ciò il fatto che la seconda macchina era dotata di un programma mediante schede, si comprende perché molti sostengono che già qui era comparsa l'idea della macchina a "general purpose".¹⁸⁵

Ispirandosi a principi costruttivi in parte diversi, una Macchina alle Differenze fu infine ultimata nel 1853 dal tipografo svedese George Scheutz. Fu adottata dal Dudley Observatory di Albany, New York, per la produzione di tavole astronomiche e dalla Somerset House per la produzione di tavole sull'aspettativa di vita.¹⁸⁶

Esigenze scientifiche, innanzitutto dell'astronomia stanno alla base di uno dei principali filoni moderni del calcolo scientifico, dipanatosi nel corso degli anni Trenta e durante la Seconda guerra mondiale. Macchine di calcolo per scopi scientifici come quella di Scheutz erano estremamente costose; si pensò perciò di utilizzare a scopi scientifici assemblaggi di macchine commerciali. Leslie John Comrie (1893-1950), matematico e astronomo neozelandese, che dal 1926 al 1936 diresse il Nautical Almanac Office britannico, ebbe l'idea di utilizzare macchine commerciali e tabulatrici IBM per la creazione di tavole astronomiche. Tale metodo fu imitato anche dall'astronomo Wallace J. Eckert (1902-1971) alla Columbia University di New York. Qui nel 1929 Thomas J. Watson, allora direttore dell'IBM, aveva fornito macchine IBM allo Statistical Bureau dell'Università, che fu poi trasformato nel "Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau".¹⁸⁷ La strategia industriale dell'IBM consisteva nel produrre delle macchine con diverse funzioni (perforatrici, tabulatrici, addizionatrici ecc.), che erano collegabili tra loro. Questa modularità, con una disponibilità a

¹⁸³ Herman Hollerith, *An Electric Tabulating System*, in Randell (1982a, p. 129); Anon (1902).

¹⁸⁴ Anon (1902); Pratt (1990, p. 182).

¹⁸⁵ Cfr. ad esempio Pratt (1987, p. 74) e Breton (1987, p. 38).

¹⁸⁶ Cfr. ad esempio Pratt (1987, pp. 126-137).

¹⁸⁷ Cfr. Goldstine (1973), p. 109; Flamm (1988, p. 31); Rodgers (1969, pp. 133-48); Bashe *et al.* (1986, pp. 22-4).

modificare le macchine a seconda delle esigenze, permetteva che fossero creati degli assemblaggi adatti per i calcoli scientifici. Il laboratorio della Columbia University fu dotato tra le altre macchine di una moltiplicatrice IBM 601, versione modificata su apposite indicazioni di Wallace J. Eckert per compiere interpolazioni.¹⁸⁸

L'attività di W. J. Eckert fu di ispirazione per il progetto di Howard Aiken (1900-1973). Questi dopo aver ottenuto un *Bachelor* in ingegneria elettrica, conseguì nel 1939 un *Ph.D.* in Fisica applicata a Harvard sotto E. L. Chafee.¹⁸⁹ Aiken si interessava in particolare al movimento di cariche elettriche in un triodo, che implicava la soluzione di equazioni differenziali ordinarie non lineari [cfr. Aiken 1973, p. 2]. Ispirandosi molto probabilmente anche al lavoro di Babbage [cfr. Randell 1982, p. 191], egli si rese conto che tale problema poteva essere risolto mediante una complessa computazione da parte di un calcolatore numerico. Attraverso gli astronomi di Harvard, venne in contatto con il laboratorio di Wallace Eckert e con l'IBM [cfr. Goldstine 1973, p. 111]. Si cominciò così a progettare la creazione all'Università di Harvard di un centro di calcolo a scopi scientifici imperniato su una macchina che fu costruita dall'IBM su indicazioni di Aiken, in grado di svolgere senza intervento umano lunghe catene di calcoli [cfr. Cohen 1999, pp. 45-6]. Nel 1939 Harvard e IBM firmarono un contratto per la progettazione e la costruzione della macchina, che fu consegnata nel 1944 e che sarà conosciuta come Harvard Mark I. L'enorme macchina

«era di tipo elettromeccanico, conteneva 72 contatori per immagazzinare i numeri, ciascuno dei quali era composto da 23 cifre più il segno. Oltre a questi c'erano 60 indicatori controllati da interruttori manuali nei quali potevano essere immagazzinate le costanti. La macchina impiegava circa sei secondi per eseguire una moltiplicazione e circa dodici per una divisione. C'erano anche tre unità che calcolavano logaritmi, esponenziali e seni (o coseni).» [Goldstine 1973, 112-3]

L'architettura dell'Harvard Mark I era molto classica. Era mosso da un albero motore azionato elettricamente. A differenza della tradizionale architettura IBM a schede perforate adottava però un largo nastro cartaceo perforato. Inoltre utilizzava 330 relè, anche se al solo scopo di controllare la rotazione delle tradizionali ruote di conteggio a dieci posizioni.

L'evoluzione delle tecnologie delle telecomunicazioni

Relé e nastri perforati erano utilizzati nell'Harvard Mark I essenzialmente per riprodurre con mezzi elettrici i classici schemi meccanici introdotti da Leibniz. In ogni caso vediamo già in quest'uso una interessante convergenza tra calcolo automatico e tecnologie sviluppate nell'ambito delle telecomunicazioni, una convergenza che negli stessi anni si verificò in molti altri ambiti, anche attraverso schemi progettuali nuovi, più adatti alla tecnologia elettrica.

Se il calcolo meccanico aveva vissuto fino ad allora vita grama, così non era stato per le telecomunicazioni. Anzi, andrebbe chiarito che la tesi di un'età dell' "energia" seguita da una della "comunicazione", di un'età della macchina a vapore seguita da una delle macchine di comunicazione, sostenuta con forza da Wiener e divenuta oggi un luogo comune, diviene problematica quando si studiano le cose nel dettaglio. Si scopre che la rivoluzione industriale ha dato luogo tanto ad un' "età del treno", che ad una "età del telegrafo" e che a ben vedere telegrafo e treno si sono letteralmente coevoluti. Esigenze evidentemente profonde solleccitarono alla fine del Settecento le società civili occidentali a realizzare rapidi ed economici sistemi di telecomunicazione. Straordinario è come un sistema basato su una tecnologia davvero arcaica (in quanto sistemi di comunicazione ottica erano stati adottati già

¹⁸⁸ Cfr. Da Cruz (2010), nonché il libro di Eckert (1940). La storia del progetto di Eckert è ricostruita da Brennan (1971).

¹⁸⁹ La tesi di *Ph.D.* di Aiken, con Chafee come *advisor* era intitolata: "A Study of the Laws of Space Charge", cfr. l'elenco Harvard Physics Ph.D. Theses, 1873-1953, <http://www.physics.harvard.edu/>.

dai Greci e dai Romani) come il telegrafo ottico di Claude Chappe,¹⁹⁰ si sia così rapidamente diffuso in Francia sul finire del Settecento sull'onda della Rivoluzione francese, giungendo a coprire il territorio con circa 5.000 km di linee entro la metà dell'Ottocento, periodo in cui fu soppiantato definitivamente dal telegrafo elettrico.¹⁹¹ È altrettanto sorprendente vedere come le proposte di telegrafi elettrici che si susseguirono dal 1753 in poi tendessero a far rifluire immediatamente nel campo applicativo della telegrafia anche il più piccolo vagito della contemporanea elettrologia, dagli elettroscopi alle diverse pile all'elettromagnetismo.¹⁹² Alla fine, i due sistemi telegrafici elettrici commerciali che si affermarono con più forza furono in Inghilterra quello di Sir William Fothergill Cooke e Sir Charles Wheatstone, e negli Stati Uniti quello di Samuel F. B. Morse, che a New York iniziò ad interessarsi al telegrafo nel 1832, con a fianco l'abile meccanico Alfred Vail.

Sin dall'inizio, il telegrafo aveva posto il problema se trasmettere segnali su altrettanti fili paralleli per ogni lettera, oppure su un unico filo mediante una combinazione di segnali secondo un codice predeterminato. Per questa seconda via la telegrafia tese molto precocemente ad intrecciarsi con i metodi crittologici, da secoli legati alla necessità di preservare la segretezza nelle comunicazioni. Nel 1835 Morse inventò il sistema a punti e linee per rappresentare numeri e lettere che porta il suo nome. Nel 1837 ottenne un brevetto per un telegrafo elettromagnetico, in cui un elettromagnete permetteva ad uno stilo di tracciare i segni su una striscia di carta. Il telegrafo si estese in parallelo alle reti ferroviarie e già nel 1856 esisteva un cavo telegrafico transatlantico. L'industria telegrafica, in Inghilterra, inizialmente dominata dalla Electric Telegraph Company, fu nazionalizzata nel 1870 ed accorpata nel British Post Office. Negli Stati Uniti invece acquistò sempre più una posizione di monopolio la Western Union Telegraph, fondata nel 1851.

L'invenzione del relè - un interruttore automatico azionato da un elettromagnete mediante un impulso elettrico - scaturisce in questo contesto, negli anni Trenta dell'Ottocento, appena scoperti i fenomeni elettromagnetici, che produssero di lì a poco l'invenzione del motore elettrico, della dinamo e, appunto, del relè. Introdotto dall'americano Joseph Henry, lo ritroviamo nel telegrafo di Morse del 1857, utilizzato come dispositivo per ridare energia al segnale telegrafico che tendeva ad attenuarsi dopo 30-40 km,¹⁹³ applicazione da cui prende il nome, in quanto "relais" era il termine che i francesi usavano per indicare le stazioni di posta dei corrieri a cavallo e poi le torri di rilancio del segnale ottico.

Il relé assunse di lì a poco una importanza cruciale nello smistamento delle comunicazioni, sia in telegrafia che nella nascente telefonia, per automatizzare i centralini inizialmente gestiti manualmente da operatori con cavi e spinotti. La Bell Telephone Company, in possesso del brevetto del telefono di Alexander Graham Bell, venne fondata nel 1877. Dopo una schermaglia legale tra Bell e Western Union, nel 1879 si giunse ad un accordo secondo cui la seconda si sarebbe limitata alla telegrafia e la prima alla telefonia. Di lì a poco, nel 1909, la Bell acquisì la Western Electric,¹⁹⁴ formando un enorme colosso mondiale delle comunicazioni, che ebbe come braccio di ricerca e sviluppo i Bell Telephone Laboratories, dove iniziarono a collaborare insieme i ricercatori di entrambe le compagnie. In questo modo l'industria del telegrafo e quella del telefono convissero in parallelo per molto tempo, con frequenti scambi di tecnologia. Si riuscì, per esempio, a trasmettere sulla stessa linea sia i segnali telegrafici che quelli telefonici. Uno sforzo importante fu rivolto alla questione della trasmissione del segnale

¹⁹⁰ Rispetto ai sistemi antichi, l'unica vera novità dei sistemi semaforici introdotti in questo periodo è costituita dall'uso del telescopio, invenzione che comunque allora aveva già quasi duecento anni di vita.

¹⁹¹ [Flichy 1994], p. 157.

¹⁹² [Derry – Williams 1960], tr. it., "telegrafia e telefonia" pp. 718-728.

¹⁹³ Sul telegrafo [EST 1975], pp. 453, 482, 492. Su telefono e telegrafo [EST 1977], p. 68.

¹⁹⁴ [Flichy 1991] tr. it., p. 157.

senza distorsioni su lunghissime distanze. Prima la cosiddetta “linea caricata” di Heaviside per il telegrafo, poi l’amplificatore a *feedback* di Black per il telefono si inscrivono in questa linea di ricerca.

Un’altra necessità era data dall’ottimizzazione della trasmissione dell’informazione, da cui si sviluppò la “teoria dell’informazione”. Tale bisogno spinse verso il *multiplexing*, l’utilizzo cioè dello stesso cavo per più comunicazioni bidirezionali. Nel 1903 l’inglese Donald Murray, seguendo idee di Baudot, aveva migliorato il “time-division multiplex system”. Murray modificò il codice Baudot assegnando i codici più brevi alle lettere più frequenti, come aveva fatto Morse con il suo codice. Il nuovo codice Baudot si basava su nastri perforati di carta che correvano su 5 piste ed avevano perciò 5 bit (termine che non era stato ancora introdotto) per riga, codificando 32 simboli. Nel 1912 Murray vendette il brevetto alla Bell. Così nel 1924 l’American Telephone & Telegraph Company (Bell) introdusse il Teletype, un sistema dotato di una macchina da scrivere in grado di inviare messaggi e riceverli mediante una stampante. La macchina era in grado di codificare e decodificare il codice Baudot, a 5 bit e 32 caratteri, che poteva essere stampato su nastro cartaceo perforato, ma anche decodificato e stampato in chiaro. Il codice venne usato nelle telescriventi fino al 1966, quando sarà sostituito dal ben noto American Standard Code for Information Interchange (ASCII), codice a 7 bit e perciò che poteva codificare 128 simboli.

Il centralino telefonico manuale è del 1878. Ad ogni abbonato corrispondeva nella “switchboard” una presa (“jack”) ed un cavetto (“cord”) terminante con uno spinotto. L’operatore doveva inserire il cavetto del chiamante nel jack del chiamato. L’idea della commutazione automatica apparve però già l’anno dopo. Tra il 1889 e il 1896 Almon Brown Strowger e collaboratori crearono un sistema dotato di una matrice di 100 terminali con un sistema a spazzole, azionato dal numeratore a ruota dell’apparecchio telefonico. Nel 1913 J. N. Reynolds della Western Electric (Bell), brevettò un commutatore telefonico conosciuto come “*crossbar switch*”; utilizzato nel 1919 dalla compagnia telefonica di Stato svedese, questo sistema fu utilizzato in maniera sistematica negli Stati Uniti dal 1938.¹⁹⁵

La teoria dei circuiti a relè e i calcolatori di Stibitz e di Zuse

L’uso sempre più ampio di circuiti a relè fece nascere il bisogno di una specifica teoria di questi circuiti, che prese avvio alla fine dell’Ottocento nel campo delle segnalazioni ferroviarie.¹⁹⁶ Ne scaturì una vasta letteratura attestata soprattutto nel contesto linguistico tedesco; nel 1911 uscì già un manuale, più volte ripubblicato, sulla “Teoria della commutazione”.¹⁹⁷

Sulla scia di questa tradizione si giunse negli anni Trenta, in diverse parti del mondo, ad elaborare una teoria che permetteva di implementare il calcolo logico booleano mediante circuiti a commutazione.¹⁹⁸ In Giappone, dal maggio 1936, esce un articolo di Akira Nakashima (1908-1970), seguito da numerosi approfondimenti dell’autore.¹⁹⁹ È interessante notare che Nakashima era impiegato presso la Nippon Electric Company (NEC), *joint venture* con capitale della Western Electric dal 1899, e i cui laboratori erano in stretti rapporti con i BTL.²⁰⁰

¹⁹⁵ [Flichy 1991], pp. 200-204.

¹⁹⁶ Cfr. [Bauer 2007] tr. ingl., p. 56.

¹⁹⁷ [Kolbe 1893]; [Edler 1900]; [Lischke 1911]; cfr. le ricchissime bibliografie cronologiche sulla teoria sistemi di commutazione [Holst 1961] e [Stankovic - Sasao - Astola 2001].

¹⁹⁸ Per la storia dell’algebra dei relè [Kalin 1952], [Zemanek 1991], [Stankovic – Astola – Karpovsky 2007].

¹⁹⁹ Cfr. [Nakashima 1936]. L’articolo esce in Giapponese, ma riassunti degli articoli venivano pubblicati in inglese. Su Nakashima vedi [Takahashi s.d.]

²⁰⁰ Tale situazione di possibile intercomunicazione si protrasse fino al 22 dicembre 1941, quando con lo scoppio della guerra tra USA e Giappone le relazioni finanziarie e di cooperazione tra le due compagnie si interrompono.

In Russia, Victor Ivanovich Shestakov (1907–1987) era giunto a conclusioni analoghe nella sua tesi di laurea del 1938, dopodiché scrisse una serie di articoli il primo dei quali era del 1941.²⁰¹ Shestakov si muoveva sulle orme di una intuizione che nel 1910 il fisico e matematico Paul Ehrenfest (1880–1933)²⁰² aveva espresso recensendo un libro di Couturat (1905). Un'altra autrice da citare è l'autriaca Johanna Piesch. Il lavoro più noto di Claude Shannon del 1937 e 1938, su cui torneremo poco più avanti si colloca in questo contesto.

Contemporaneamente scaturì anche l'idea che i circuiti a relè e in generale gli apparati utilizzati per la commutazione automatica in telefonia potessero essere utilizzati per la realizzazione di calcolatori aritmetici binari. A differenza di ciò che accadrà ancora nell'Harvard Mark I, in questo caso era lo stato dei relè in quanto tali, acceso o spento, "1" o "0", e non la solita ruota numerata ad indicare i numeri. Dal punto di vista dell'architettura dei calcolatori questo può essere visto dunque certamente come una svolta epocale. D'altro canto tale metodo appare molto meno rivoluzionario se lo si vede come l'estensione alle tecnologie del calcolo dei classici metodi di codifica usati nel telegrafo. Ricordando poi la già citata convergenza tra codifica telegrafica e crittografia, non sorprende scoprire che il sistema di numerazione binaria era stato introdotto da Francesco Bacon a scopi crittografici.

Questo principio fu utilizzato in almeno due serie di calcolatori a relè telefonici: in quella di Konrad Zuse in Germania e in quella dei BTL, iniziata da George Stibitz negli Stati Uniti. Di questi ultimi calcolatori, detti Bell Telephone Relay Computers (BTRC), furono create tra il 1937 e il 1949 sette versioni contrassegnate nel dopoguerra come "Model" seguite dalla numerazione da 1 a 6 (più la prima di prova di Stibitz detta Model K). Erano versioni sempre più complesse di calcolatori digitali binari a relè elettromeccanici, muniti di tastiere e stampanti da telescrivente [cfr. Andrews 1951, p. 101], connesse al sistema di calcolo con nastri cartacei perforati in codice Baudot.

George Stibitz (1904–1995) aveva iniziato a lavorare sull'idea dei computer a relè nel 1937 con un modello di prova, il cosiddetto Model K (Kitchen). Nel 1938 i BTL avevano deciso di applicare il suo metodo alla costruzione di una macchina per il calcolo dei numeri complessi, esigenza molto sentita in vari reparti dei BTL, sempre alle prese con il trattamento dei segnali. Queste ricerche condussero alla realizzazione, tra l'aprile del 1939 e il gennaio 1940 di un *Complex Number Calculator*, conosciuto come Model I, che operava con cifre binarie ed effettuava solo moltiplicazioni e divisioni di numeri complessi. Aveva circa 400 relè e 10 *crossbar switches*.²⁰³ George Stibitz, supervisore e progettista di alcuni componenti, fu coadiuvato dall'ingegnere Samuel B. Williams.²⁰⁴ L'11 settembre 1940 Stibitz ne diede una presentazione al Congresso estivo dell'American Mathematical Society tenutosi al Dartmouth College di Hannover i giorni 9-12 settembre 1940. Per offrire ai congressisti la possibilità di verificare da soli le potenzialità della macchina, T. C. Fry, direttore del reparto di ricerche matematiche dei BTL e superiore di Stibitz, fece in modo che il calcolatore potesse operare in modalità remota, ponendo in un'aula del Dartmouth College una telescrivente collegata in maniera standard (telegraficamente) con il calcolatore di Stibitz, che restava collocato fisicamente nella sede dei BTL a New York [cfr. Hollcroft 1940, p. 861].²⁰⁵

²⁰¹ Cfr. la tesi Shestakov (1938) poi confluita nell'articolo Shestakov (1941), entrambi in russo.

²⁰² In una recensione Alonzo Church (1953) informava il pubblico anglofono dell'esistenza di questo precedente, riferendo una notizia ricevuta da George L. Kline. La questione fu poi approfondita da Kautz (1966).

²⁰³ Cfr. Andrews (1951, p. 101) e Irvine (2001).

²⁰⁴ Stibitz, G.R., "Curriculum Vitae," data 1938 un progetto per un "Electrical device for finding complex roots of polynomials" e una serie di circuiti per un "Bell Telephone Laboratories Relay Computer."

²⁰⁵ Negli stessi giorni vi furono in contemporanea i congressi di American Mathematical Society, Mathematical Association of America e dell'Institute of Mathematical Statistics. *Ivi*, p. 859.

Come abbiamo visto sopra [cfr. capitolo 2], Stibitz nell'ottobre 1941 era divenuto supervisore del progetto sugli A.A. Directors di Wiener e Bigelow. È interessante notare come uno studioso come Stibitz abbia costantemente lavorato a cavallo tra calcolo analogico e calcolo digitale. In questi anni, in realtà, non si può parlare in maniera definita di una cesura tra le due tecnologie. Sebbene fossero chiare agli addetti ai lavori le differenze di fondo tra l'approccio analogico e quello digitale (allora detto preferibilmente "aritmetico" o "numerico"), si assisteva in quel periodo ad un interscambio molto ampio di personale e tecnologie, e non raramente anche ad una ibridizzazione di sistemi analogici e digitali. Stibitz si occupò in particolare della estensione del suo calcolatore digitale a relè al problema della verifica dell'efficacia dei diversi predittori. A tal fine, sul finire del 1942, la Sezione D2 sottoscrisse il contratto "project #60" con la Western Electric e i BTL per un *Punched Tape Dynamic Tester*,²⁰⁶ un sistema utilizzante l'algebra logica a relè, dotato di un albero rotante connesso a 32 contatti i quali a loro volta attivavano un insieme di relè che leggevano la posizione desiderata attraverso i buchi di un nastro perforato, in maniera abbastanza simile a ciò che avveniva in una centrale telefonica automatica.²⁰⁷ Nel giugno 1943 Stibitz propose il progetto denominato *Relay Interpolator*, poi chiamato Model 2, che probabilmente era solo un riadattamento del *Tester*.²⁰⁸ Secondo diversi promemoria di Stibitz indirizzati alla Divisione 7, il *Relay Interpolator* era in grado di trattare l'analisi armonica e lo smoothing. Esso poteva leggere, scrivere, immagazzinare e aggiungere numeri ed essere programmato per semplici operazioni.²⁰⁹ Si trattava dunque ormai di un calcolatore numerico in grado di sostituire i calcolatori analogici utilizzati dai predittori. I BTL svilupparono altri sistemi basati sulla stessa architettura ma con più relè. Nel giugno 1944 entrò in servizio a Camp Davis, N.C., un *Relay Ballistic Computer*, che si fa coincidere con il Model III, utilizzato per la sperimentazione di dispositivi per il controllo del tiro; aveva 1.400 relè ed usava 7 telescriventi, era in grado di correggere eventuali errori che insorgessero nel corso del suo operare.²¹⁰ I BTL produssero altri tre calcolatori. Uno per il Naval Research Laboratory, cui ci si riferisce come al Model IV, simile al Model III [cfr. Andrews 1951, p. 102]; e due copie di un Model V, una consegnata al NACA nel dicembre 1946 e una all'Aberdeen Proving Ground. Ciascuna possedeva 9.000 relè e 55 telescriventi, era costituita da 6 computer integrati tra loro ed in grado di eseguire 10 problemi contemporaneamente [cfr. *ivi*]. Infine i BTL crearono un Model VI, che restò nella loro sede di New York, e che era molto simile al Model V, sebbene più semplice e meno accurato per gli aspetti legati al controllo ma dotato di 3 nastri, uno dei quali poteva avere sia

²⁰⁶ Cfr. George Stibitz "Proposed Dynamic Tester," 19 ottobre 1942. OSRD7 GP, Project #60, Box 44; "Project Recommended for Appropriation," No. 60, Section D-2 – Fire Control, "Simplified Dynamic Tester.", OSRD7 GP, Project #60, Box 45. Cfr. [Mindell 1996], p. 459.

²⁰⁷ È quanto afferma [Mindell 1996, p. 460] citando anche il rapporto: George Stibitz "Relay Servo Circuit," 28 ottobre 1942. OSRD7 GP, Project #60, Box 45. Sempre per questa macchina Stibitz avrebbe utilizzato il diagramma di Nyquist. Cfr. George Stibitz "Nyquist Loop for tape Servo," 19 febbraio 1943, "Equivalent Feedback Amplifier for Tape Servo," February, 1943. OSRD7 GP, Project #60, Box 45. Anche Shannon utilizzerà per un'altra applicazione il diagramma di Nyquist: Claude Shannon "Feedback Systems with Periodic Loop Closure, Memorandum for File," 16 marzo 1944, OSRD7 GP, Project #60, Box 45.

²⁰⁸ Non è del tutto chiaro se quando si parla del Model II ci si riferisca al "Tape Dynamic Tester" o al "Relay Interpolator". Irvine (2001, p. 25) scrive che «Stibitz had named it the Relay Interpolator, although that name was soon changed to the Model II». Tuttavia dai documenti citati da Mindell (1996) sembrerebbe si trattasse di due diverse macchine. Andrews (1951, pp. 101-2) riferisce che il Model II, dotato di 440 relè e di un nastro perforato era stato costruito per l'NDRC e che era divenuto operativo nel settembre 1943, che si trattava di un computer "special purpose", specializzato nel calcolo del controllo di tiro, ma che nel corso del suo sviluppo fu adattato a un nuovo genere di problemi.

²⁰⁹ Applied Mathematical Panel, NDRC, "A Statement Concerning the Future Availability of a New Computing Device," AMP Note No. 7, novembre 1943. OSRD GP, Project #70, Box 50. [Mindell 1996, p. 462]

²¹⁰ Cfr. "Outline of Relay Ballistic Computer," 7 luglio 1943 (OSRD7), GP, Project #74, Box 54; Juley (1947); Andrews (1951, p. 102).

numeri che istruzioni [cfr. *ivi*, p. 103]. Questo aspetto dei tre nastri era presente anche in una macchina elettronica progettata all'MIT nel 1940 da Overbeck.

Le ricerche di Stibitz sembrano parallele per molti versi a quelle condotte in Germania tra il 1934 e il 1949 dall'ingegnere aeronautico Konrad Zuse (1910–1995), che sin dall'inizio si avvalse dei consigli di Helmut T. Schreyer (1912–1984), laureato nel 1938 come ingegnere elettrico e delle comunicazioni [cfr. Bauer 1990, p. 187], poi assistente presso il Dipartimento di ingegneria telefonica e telegrafica della Technische Hochschule Berlin-Charlottenburg [cfr. Schreyer 1990]. Zuse nel 1936 presentò domanda di brevetto di un modello di calcolatore aritmetico, binario, a commutatori, a virgola mobile. I dati e le istruzioni erano forniti al sistema mediante un nastro perforato alla maniera delle telescriventi, ma preferendo la pellicola cinematografica alla carta. I circuiti a commutazione dello Z1 erano meccanici, ma i modelli successivi utilizzarono sempre relè telefonici.²¹¹ Vi fu uno Z2, quasi ultimato nel 1939, poi uno Z3 finito nel 1941, che fu il primo ad essere finanziato dal Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt [Istituto tedesco per la ricerca aeronautica] ed infine uno Z4.²¹²

I progetti digitali elettronici di Vannevar Bush

Benché esistessero già, come vedremo, dispositivi elettronici che potevano simulare il comportamento di un relè, sia i computer dei BTL che quelli di Zuse utilizzarono sempre i dispositivi standard dei centralini automatici, cioè relè telefonici e *crossbar switches* [cfr. Alt 1948]. Non è chiaro ciò che accadde in Germania al progetto condotto in parallelo a quello di Zuse da parte di Schreyer, che cercò di realizzare una versione elettronica del calcolatore di Zuse; sappiamo però abbastanza per certo per il contesto statunitense, che i BTL restarono sempre rigidamente arroccati nella difesa dei relè elettromeccanici, che essi ammettevano essere più lenti dei loro analoghi elettronici, ma che, essendo più affidabili, ritenevano sarebbero risultati vincenti nelle lunghe computazioni [cfr. per esempio Goldstine 1973, p. 117].

Anche se queste preoccupazioni circa l'affidabilità non erano prive di fondamento, sembrerebbe naturale supporre che anche logiche industriali imponessero ai BTL di preferire componenti commerciali standard in uso nelle centraline telefoniche dell'epoca, piuttosto che la loro sostituzione con tubi elettronici. Sappiamo infatti che le centraline telefoniche dell'AT&T sostituiranno le tecnologie elettromeccaniche con quelle elettroniche soltanto nel 1965, quando al posto dei triodi saranno disponibili transistor più a buon mercato [cfr. Flichy 1991, p. 208]. Così, mentre la strategia dell'IBM per rispondere a esigenze di calcolo scientifico era consistita nel creare delle supermacchine mediante l'assemblaggio di moduli commerciali standard, semmai con l'introduzione di alcune modifiche, quella dell'AT&T sembra aver privilegiato l'assemblaggio dei componenti standard delle proprie centraline telefoniche automatiche; anzi da un certo punto di vista, i calcolatori di Stibitz potevano essere visti come delle vere e proprie centraline telefoniche modificate onde consentire il calcolo aritmetico. Vannevar Bush era perfettamente consapevole di questa situazione nello scrivere un articolo del 1945 che riprendeva sue tesi precedenti. Discutendo di una serie di selettori di documenti, Bush asseriva:

«This process, however, is simple selection: it proceeds by examining in turn every one of a large set of items, and by picking out those which have certain specified characteristics. There is another form of selection best illustrated by the automatic telephone exchange. You dial a number and the machine selects and connects just one of a million possible stations. It does not

²¹¹ In realtà era denominato V1 (da "Versuchsmodell" = versione sperimentale) e fu ribattezzato Z1 nel dopoguerra, per non essere confuso con i missili usati dai nazisti per bombardare Londra.

²¹² Cfr. Randell (1982, pp. 159–161) e Williams (1997, pp. 258–271).

run over them all. It pays attention only to a class given by a first digit, then only to a subclass of this given by the second digit, and so on; and thus proceeds rapidly and almost unerringly to the selected station. It requires a few seconds to make the selection, although the process could be speeded up if increased speed were economically warranted. If necessary, it could be made extremely fast by substituting thermionic tube switching for mechanical switching, so that the full selection could be made in one hundredth of a second. No one would wish to spend the money necessary to make this change in the telephone system, but the general idea is applicable elsewhere.» [Bush 1945]

Bush sapeva che esistevano tecnologie per questo tipo di macchine scientifiche, richiedenti velocità particolarmente alte, ma riteneva che non avessero mercato. Aggiungeva:

«Rapid electrical counting appeared soon after the physicists found it desirable to count cosmic rays.

For their own purposes the physicists promptly constructed thermionic-tube equipment capable of counting electrical impulses at the rate of 100,000 a second. The advanced arithmetical machines of the future will be electrical in nature, and they will perform at 100 times present speeds, or more.

Moreover, they will be far more versatile than present commercial machines, so that they may readily be adapted for a wide variety of operations. They will be controlled by a control card or film, they will select their own data and manipulate it in accordance with the instructions thus inserted, they will perform complex arithmetical computations at exceedingly high speeds, and they will record results in such form as to be readily available for distribution or for later further manipulation.

Such machines will have enormous appetites. One of them will take instructions and data from a whole roomful of girls armed with simple keyboard punches, and will deliver sheets of computed results every few minutes. There will always be plenty of things to compute in the detailed affairs of millions of people doing complicated things.» [Bush 1945]

Troviamo qui tratteggiato in realtà un programma a cui Bush, all'epoca in cui apparve l'articolo citato, stava lavorando da circa dieci anni. Intorno alla metà degli anni Trenta, egli aveva avviato una serie di progetti incentrati sulla commutazione elettronica. Il primo era per un *Comparator*, un veloce sistema adibito alla decrittazione dei testi per il servizio crittologico della Marina, commissionato dalla Marina nel 1935. La ricerca, che si svolse all'MIT, diede luogo ad una prima versione, consegnata nel 1938.²¹³ Il secondo progetto era per un *Rapid Selector*, finalizzato all'automatizzazione di biblioteche e uffici mediante l'archiviazione e la ricerca automatica di articoli scientifici e altri documenti.²¹⁴ Il terzo, infine, era per un *Rapid Arithmetical Calculator* (o *Machine*), basato su reti a commutazione, costituite da tubi a vuoto [cfr. Burke 1991, it. p. 92]. Sebbene indipendenti, i tre progetti erano in evidente sinergia tra loro. I primi due, che sembrano essere il secondo la versione pubblica e commerciale dell'altro, invece militare e segreto, si basavano entrambi su microfilm, cellule fotoelettriche e commutazione elettronica. Quest'ultima era sviluppata anche in un parallelo progetto finalizzato ad una macchina di calcolo digitale ed elettronica, la *Rapid Arithmetical Machine*.

Alle ricerche sul *Rapid Selector*, avviate dal 1937, parteciparono anche la Eastman Kodak, specializzata nella fotografia, e la National Cash Register (NCR), una grande compagnia specializzata in calcolatrici commerciali. Esse furono svolte nei centri di ricerca delle due compagnie posti rispettivamente a Rochester, N.Y., e a Dayton, Ohio. Le due compagnie fornirono anche finanziamenti per ricerche che si svolsero in parallelo all'MIT, da parte di un gruppo di ricerca formato da ricercatori e studenti *graduate*, capeggiato da John H. Howard ed

²¹³ Probabilmente il primo responsabile delle ricerche sul *Comparator* fu Waldron S. McDonald. Vedi la serie di brevetti relativi a varie componenti presentati nel 1937: US2169977; US2184620; US2203689 e US2205299. Nel 1952 poi presenterà il brevetto per un sistema completo "Digital inventory register" US2879000.

²¹⁴ Nyce e Kahn (1991b, pp. 4 e 5), che si basano sul verbale di un incontro del Patent Committee del MIT del 14 Ottobre 1937.

altri,²¹⁵ tra cui il giovane Claude Shannon. Quando Bush, nel 1938 lasciò l'MIT per andare a dirigere la Carnegie Institution di Washington, la supervisione del progetto passò a Carroll Wilson. Nel 1940 le ricerche sul *Rapid Selector* servirono a migliorare le prestazioni del primo modello di Comparator [cfr. Burke 1991, it. 99-100] e dal 1942 confluirono nelle ricerche per lo sviluppo della "Bombe" navale statunitense,²¹⁶ cioè il parallelo del sistema crittografico sviluppato in Inghilterra da Alan Turing.

Nel 1939 fu creato all'MIT un "Center for analysis" per continuare a lavorare alla *Rapid Arithmetical Machine* ed al *Rockefeller Differential Analyser*. Dotato di un finanziamento della Carnegie Corporation di New York, il centro fu posto sotto la direzione di Samuel H. Caldwell. Il modello a cui si ispirava sembra essere stato quello del centro per il calcolo scientifico della Columbia University e di Aiken a Harvard. La sua particolarità risiedeva, però, nel fatto che era incentrato non su calcolatori commerciali, ma sulla sperimentazione di calcolatori veloci sia analogici che digitali elettronici, sebbene il lavoro sul calcolatore del secondo tipo, che si trascinò per quasi un decennio, non fu mai portato a compimento [cfr. Burke 1991, it. p. 91-2].

A ben vedere anche un quarto progetto, che costituiva - almeno per quel che se ne sa - il fulcro del "Center for analysis", e cioè il *Rockefeller Differential Analyser*, finanziato nel 1938 con 100.000 dollari dalla Rockefeller Foundation, non andrebbe visto in contrasto con gli altri tre progetti. Infatti si trattava di un analizzatore differenziale di nuova concezione, analogico, ma munito di un sistema utilizzante «migliaia di relè e circa 2.000 valvole elettroniche» per il controllo e la riconfigurazione dei problemi [cfr. Owens 1986, p. 63]. L'idea era nata dal desiderio che, come Bush aveva indicato a Weaver nel 1933, «the possibility of enabling the analyzer to switch rapidly from one problem to another in the manner of the automatic telephone exchange».²¹⁷ L'intuizione di Bush era innovativa rispetto al modo in cui si riconfiguravano anche i calcolatori digitali del tempo, quelli dell'IBM per esempio, ma anche il primo ENIAC, e cioè mediante un quadro di prese, fili e spinotti, che li rendevano del tutto simili ai centralini telefonici manuali. Bush dunque pensò di sostituire questo metodo mediante un "centralino automatico a relè" [cfr. Mindell 1996, p. 280].

Claude Shannon

I progetti di Vannevar Bush chiariscono il contesto da cui scaturì la tesi di Master di Shannon del 1937²¹⁸ su "A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits", da cui Shannon trasse nel 1938 l'omonimo articolo. Sulla figura di Shannon è opportuno soffermarsi per la rilevanza che ebbe nell'ambito della Cibernetica intesa in senso ampio.

Claude Elwood Shannon (1916-2001) era un brillante giovane che univa eccellenti doti matematico e di ingegnere. Dopo aver conseguito due *Bachelor*, uno in ingegneria elettrica ed uno in matematica alla University of Michigan, arrivò all'MIT nel settembre 1936 come *graduate student* [cfr. Shannon 1940, p. 64]. Trovò in Vannevar Bush, preside della Facoltà di Ingegneria, nonché vicerettore dell'MIT, un vero e proprio mentore, che tale restò anche quando Bush si trasferì nella sede della Carnegie Institution di Washington.

²¹⁵ Questi giovani ricercatori erano Russell Coile, John Coombs e Lawrence Steinhardt. Cfr. Nyce e Kahn (1991b).

²¹⁶ Sul "Rapid Selector" parla il rapporto annuale dell'MIT [Compton K. T. 1940, p. 103; cfr. anche Burke 1991, it. p. 97].

²¹⁷ Lettera di Bush a Weaver, 15 aprile 1933, in RFI.1/767D/2/20 sintesi di Owens (1986).

²¹⁸ In calce alla firma del candidato è riportata la data 10 agosto 1937, ma a leggere il frontespizio, l'effettiva consegna e la discussione sembrano essere avvenute nel 1940 [cfr. Shannon 1937]. Questa curiosa circostanza sembra confermata dal frontespizio della tesi per il *Ph.D.* che indica come unico titolo solo il B.S. del 1936 alla University of Michigan.

All'MIT Shannon fu inserito nel dipartimento di ingegneria elettrica come *Research Assistant* - dal settembre 1936 al giugno 1938 - nel gruppo che si occupava degli sviluppi dell'Analizzatore Differenziale [cfr. Mindell 1996, p. 281]. Il suo interesse per i circuiti a relè nacque dalla constatazione del complesso sistema di controllo a relè dell'analizzatore.²¹⁹ D'altro canto, come documenta la nota biografica della sua tesi di *Ph.D.*,

«During the summer of 1938, he [Shannon] did research work on the design of the Bush Rapid Selector, chiefly connected with the vacuum tube circuits employed in this device». [Shannon 1940, p. 64].

Nel settembre 1938 Shannon lasciò il Dipartimento di ingegneria elettrica per divenire *Assistant* presso il Dipartimento di Matematica [cfr. Shannon 1940, p. 64]. Qui cominciò ad occuparsi dell'assiomatizzazione della genetica, tema suggeritogli da Bush e che formerà l'oggetto della sua tesi di *Ph.D.* Tuttavia anche presso il Dipartimento di Matematica, continuò a lavorare sulle reti a relè. In una sua lunga lettera a Bush del 15 febbraio 1939, Shannon scriveva:

«Of course, my main project is still the machine for performing symbolic mathematical operations; although I have made some progress in various outskirts of the problem I am still pretty much in the woods, so far as actual results are concerned and so can't tell you much about it. I have a set of circuits drawn up which actually will perform symbolic differentiation and integration on most functions, but the method is not quite general or natural enough to be perfectly satisfactory. Some of the general philosophy underlying the machine seems to evade me completely».²²⁰

Il giorno successivo, scriveva ancora a Bush che stava continuando a pensare a meccanismi per la realizzazione di operazioni simboliche e che era interessato ad estendere la "switching algebra" «to other types of circuits, hydraulic, mechanical, optical, etc».²²¹

Dal punto di vista teorico, secondo Sloane e Wyner, contribuirono al successo di Shannon certamente i suoi studi di logica presso la University of Michigan ma anche un suo soggiorno presso i BTL nell'estate 1937.²²² Sembra naturale che Bush avesse l'esigenza che i propri allievi prendessero dimestichezza con i circuiti a commutazione telefonici. I risultati di Shannon vanno inoltre iscritti lungo la linea delle ricerche sulla teoria dei circuiti a commutazione che li aveva preceduti. La scarsa bibliografia posta da Shannon in calce alla sua tesi e all'articolo omonimo²²³ cita solo testi di logica e sembra davvero singolare che l'autore non abbia potuto basarsi né sulla lunga tradizione della teoria dei circuiti a commutazione, né che abbia avuto il minimo sentore dei contributi degli altri studi sull'algebra a relè. Solo in un articolo del 1949, Shannon citerà Johanna Piesch e Nakashima Akira, senza comunque riconoscere loro nessun debito.²²⁴

²¹⁹ Cfr. intervista di Hagemeyer a Shannon 1977:1/60 citata in Hagemeyer (1979, p. 342). Circostanza confermata dalla "biography" della tesi di *Ph.D.* in cui si dice che dal settembre 1936 al giugno 1938 era stato "in charge of the Differential Analyzer" [cfr. Shannon 1940, p. 64].

²²⁰ Lettera di Shannon a Vannevar Bush, 15 febbraio 1939 (VBLC). Si cita dal riassunto di Hagemeyer (1979, pp. 355-6).

²²¹ Lettera di Shannon a Bush, 16 febbraio 1939 (VBLC) L.O.C., 102: 2401; citata da [Hagemeyer 1979], pp. 355-356.

²²² Cfr. Sloane e Wyner 1993. Del soggiorno dell'estate 1937 di Shannon ai BTL parla anche Segal (2003, p. 74) e Segal (1998).

²²³ Della tesi, Shannon pubblicò un estratto nel dicembre del 1938 [Shannon 1938]. In calce alla prima pagina dell'articolo viene riferito che l'articolo è un riassunto della Tesi presentata per il master of science all'MIT, che era stato fu inviato alla rivista il 1° marzo 1938, reso disponibile in preprinting il 27 maggio 1938, presentato alla summer convention dell'AIEE di Washington, D.C., 20-24 giugno 1948 e raccomandato dagli AIEE committees on communication and basic sciences (cfr. *ivi*, p. 713).

²²⁴ Gli unici debiti che Shannon riconosce in [Shannon 1938], p. 713 sono "to Doctor F. L. Hitchcock, Doctor Vannevar Bush, and Doctor S.H. Caldwell, all of MIT, for helpful encouragement and criticism." La bibliografia in calce all'articolo rimanda ad una più completa bibliografia della letteratura di logica simbolica in *Journal of*

Diciamo questo non per sminuire il contributo di Shannon, che produsse comunque un importante lavoro di sistemazione dell'intera materia, ma solo per sottolineare come le sue idee non siano spuntate all'improvviso come funghi.

Nell'estate del 1940 Shannon ottenne un impiego estivo presso il Dipartimento per le ricerche matematiche dei BTL, diretto da Fry, dove si trovò a lavorare a fianco di Stibitz. Qui egli scoprì che le ricerche sull'algebra a relè erano tenute in gran conto ²²⁵ e scrisse stupito a Bush:

«I got quite a kick when I found out that the labs are actually using the relay algebra in design work and attribute a couple of new circuit designs to it.»²²⁶

Non è chiaro se il riferimento vada ai risultati della sua tesi o a ricerche di altri. In ogni caso Fry già da qualche tempo aveva proposto a Shannon di entrare ai BTL. Qui veniamo a toccare un punto interessante che riguarda le differenze tra la ricerca in ambito accademico e in ambito industriale. Shannon si trovò a dover affrontare una scelta riguardante il proprio futuro e scrisse a Bush che:

«T. C. Fry of Bell Labs, has suggested that they may have a job for me if I want it. But I am not at all sure that that sort of work would appeal to me, for there is bound to be some restraint in an industrial organization as to type of research».²²⁷

D'altro canto, aggiungeva Shannon, l'insegnamento che lo avrebbe aspettato all'MIT non lo attraeva. Ci sarebbe stata, però, un'alternativa, spiegava Bush: la possibilità di lavorare allo IAS di Princeton, un ambiente di ricerca del tutto libero e privo di obblighi didattici.²²⁸ Bush non lo invogliò ad entrare ai BTL, scrivendogli:

«The Bell Laboratories are fine, and they restrict their mathematical group very little indeed, that they are considering a commercial organization. Nevertheless I feel that you ought to be in some place where you can follow your own inclinations to a very considerable extent for some time longer.»²²⁹

In autunno Shannon ottenne una borsa di studio per l'anno accademico 1940-'41 allo IAS di Princeton, per studiare sotto Hermann Weyl (1885–1955), uno dei massimi matematici del Novecento, che proprio in quell'anno pubblicava la sua *Algebraic Theory of Numbers* [Weyl 1940]. Formalmente Shannon vi si recò per continuare a sviluppare la propria teoria algebrica della genetica,²³⁰ anche se di fatto era attratto più che mai dall'idea di assiomatizzare la teoria delle comunicazioni.²³¹ Però fu presto trascinato fuori dalle calme acque dello IAS dal tumulto delle ricerche di guerra, un corrente in piena che avrebbe travolto anche la torre d'avorio

Symbolic Logic, vol. I, No. 4, Dicembre 1938 – dove però non c'è traccia di lavori sui circuiti a relè; poi cita [Louis Caturat [sic], *The Algebra of Logic*, The Open Court Publishing Co.; A. N. Whitehead, *Universal algebra*, Cambridge, The University Press, vol I, Book II, Chapters I and II, pp. 35-82 e E. V. Huntington, *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 35, 1933, pp. 274-204. La bibliografia della tesi aggiunge oltre citati ai citati anche George Boole, *Finite Differences*, G. E. Strechert, Chap. X; e L. E. Dickson, *History of the Theory of Numbers*, Vol. I Carnegie Institution of Washington, Chap. XIII. Al contrario nella bibliografia di Shannon, C., "The Synthesis of Two-Terminal Switching Circuits," *Bell System Technical Journal*, Vol. 28, No. 1 (Jan., 1949), pp. 59-98, rimanda a vari lavori di A. Nakashima del 1938, e di Johanna Piesch.

²²⁵ Cfr. Hagemeyer (1979, p. 346) nota che già nel "Annual report of the AT&T" del 1936 si insisteva sull'estendere le ricerche sui circuiti a relè.

²²⁶ Lettera di Shannon a Bush, 5 giugno 1940 (VBLC) 102:2401, citata da [Hagemeyer 1979], p. 346.

²²⁷ Lettera di Shannon a Bush, 8 marzo 1940 (VBLC) 102:2401. Cito da [Hagemeyer 1979], nota 1237 a p. 352.

²²⁸ Lettera di Shannon a Bush, 8 marzo 1940 (VBLC) 102:2401. Cito da Hagemeyer (1979, p. 352)

²²⁹ Lettera di Bush a Shannon, 11 marzo 1940, (VBLC) 119:2880. Cito da Hagemeyer (1979, p. 352).

²³⁰ Lettera di Shannon a Bush, 15 dicembre 1939, (VBLC) 102:2401. Cito da Hagemeyer (1979, p. 347).

²³¹ Cfr. Claude Shannon, Intervista di Hagemeyer, 1977 (1/270). Citata da Hagemeyer (1979, p. 347).

dell'IAS, se si pensa che anche Weyl lavorerà in seguito sui progetti per le onde d'urto prodotte dalle esplosioni.²³²

Dal novembre 1940 Shannon fu coinvolto nei progetti bellici della Sezione D2 dell'NDRC. Ed a conferma di ciò che si diceva in precedenza sul fatto che analogico e digitale non erano affatto due campi separati, a Shannon – che generalmente è visto come un autore che ragiona in termini essenzialmente discreti – fu chiesto, su suggerimento di Fry, di trattare questioni in gran parte analogiche, in particolare di matematica dei predittori, a motivo delle sue abilità matematiche e della sua esperienza sull'analizzatore differenziale. Fu perciò associato alle ricerche sul predittore dei BTL.²³³ Nel 1941 Shannon entrò definitivamente ai BTL, dove resterà per 15 anni. Da una lettera del 4 giugno 1941, lo stesso giorno in cui si era svolto il convegno in cui il gruppo di ricerca sui predittori dei BTL aveva incontrato Wiener e Bigelow (cfr. *infra* capitolo 2), apprendiamo che Shannon desiderava occuparsi ai BTL di una “general theory of transmission and transformation of information.”²³⁴ Questa sembra una chiara testimonianza di quale attrattiva esercitassero le idee di Wiener su di lui. Poi almeno dal 1942 egli si occupò più specificamente di crittologia nel quadro dei progetti che i BTL avevano sottoscritto con il Signal Intelligence Service dello US Army.²³⁵ Le sue ricerche sulle algebre, sui circuiti digitali, sui problemi di codifica affrontati per il Bush Rapid Selector e per il computer di Stibitz, nonché il lavoro svolto sullo *Yellow Peril* di Wiener, ed il suo interesse - databile dall'inizio del 1939 - per una formalizzazione delle telecomunicazioni, confluiscono nelle ricerche crittologiche. Shannon collaborò in maniera intensa alle ricerche crittografiche che utilizzavano la tecnica Pulse Code Modulation (PCM).²³⁶ Per questa via Shannon giunse a formulare nel 1945 il rapporto segreto “A Mathematical Theory of Cryptography”,²³⁷ e poi a redigere *A Mathematical Theory of Communication* (1948).²³⁸

I progetti per calcolatori aritmetici elettronici

La possibilità di creare reti di commutatori costituite da tubi elettronici era in teoria presente da tempo, almeno dal 1918-1920, quando W. H. Eccles e F. W. Jordan avevano introdotto il “flip-flop” (conosciuto anche come “trigger circuit” o ancora come “multivibratore bistabile”):

²³² Si veda per esempio il rapporto “restricted” ora “declassified”: Hermann Weil, “Shock Waves in Arbitrary Fluids.” March 1944. A Note Submitted by the Applied Mathematics Group, New York University to the Applied Mathematics Panel. National Defense Research Committee. AMP Note No. 12 AMG-NYU No. 46.

²³³ Lettera di Weaver a R. G. Harrison; 1.11.1940, NAA 227, OSRD, Proj.7, Contract NDRC-105 Princeton. [Hagemeyer 1979], p. 347. Il primo contratto di Shannon per l'NDRC prevedeva «Analytic theory of director schematics, theory of stability of systems of servomechanisms, exploration of use of all possible coordinate systems in prediction problems, approximations involved in various formulations of prediction formulas, analytical theory of power tracking, analysis of stability considerations in lead computing sights.» “Project recommended for appropriation” Richiesta del 1.11.1940. [Hagemeyer 1979], p. 347. La D2 sottoscrisse in seguito alla richiesta il progetto#7, per il quale Shannon redigerà una serie di “Mathematic Studies Relating to Fire Control”, finalizzati a studiare il predittore antiaereo meccanico della Sperry ed un altro del Frankford Arsenal. In merito al predittore del Frankford Arsenal, Shannon redigette una “Description of Antiaircraft Director,” 12 novembre 1940, OSRD7, Misc. Project Files, Box 68. Minute dell'incontro della Sezione D2 del 28 gennaio 1941, OSRD7 GP, collected diaries, Box 70. Cfr. [Hagemeyer 1979], p. 347; [Mindel 1996], p. 447. Una parte di queste ricerche rifluirono nella pubblicazione [Shannon 1941].

²³⁴ Lettera di Shannon a Eisenhart, Preside della Princeton University, 4 giugno 1941. NAA in S4. [Hagemeyer 1979], p. 292. Lo stesso giorno si era tenuto il convegno ai BTL sui predittori in cui Shannon, in cui era stato presentata anche la ricerca di Wiener e Bigelow.

²³⁵ Bode, intervista di Hagemeyer, 1977 (2/200), in [Hagemeyer 1979], p. 348.

²³⁶ Shannon redigette molto probabilmente numerosi rapporti, per la maggior parte non inclusi negli *Shannon's Collected Papers*, riferibili alla PCM in parte rifluiti nella pubblicazione [Oliver - Pierce - Shannon 1948]. Sulla storia della tecnica PCM vedi [Kester 2004], cap. 1°: “Data Converter History”.

²³⁷ [Shannon 1945] poi pubblicato come [Shannon 1949].

²³⁸ [Shannon 1948], poi ripubblicato in [Shannon - Weaver 1949].

un opportuno accoppiamento di due triodi, in grado di funzionare come relè elettromeccanico.²³⁹

Nelle centrali telefoniche automatiche però non fu mai adottata l'elettronica a valvole e solo verso la metà degli anni Sessanta si iniziarono a diffondere centraline a transistor (un dispositivo a semiconduttori in grado di svolgere le medesime funzioni del triodo). La spinta verso l'adozione della tecnologia elettronica a valvole per la creazione di dispositivi di commutazione provenne dal settore della rivelazione delle radiazioni ionizzanti, in particolare dall'introduzione delle camere a ionizzazione, di cui un esempio classico è dato da quella impiegata per la rivelazione delle radiazioni alfa nel contatore del tedesco Hans Geiger (1882–1945), inventato tra il 1907 e il 1909 mentre studiava presso Ernest Rutherford a Manchester, in Gran Bretagna. Nel 1928 Geiger all'Università di Kiel, in Germania, in collaborazione con Walther Müller (1905-1979), estese il suo sistema alla rivelazione di altri tipi di radiazioni ionizzanti.

Una camera a ionizzazione è un tubo riempito di gas a bassa pressione e dotato di due elettrodi sottoposti ad una importante differenza di potenziale, dell'ordine del migliaio di volt nel contatore Geiger-Müller. Il passaggio nella camera di radiazioni ionizzanti avvia un complesso processo che si traduce in impulsi elettrici rilevabili ai capi degli elettrodi [cfr. Price 1964, it. pp. 130-162]. I metodi per analizzare gli impulsi sono vari, tra questi quello che risultò più utile per lo sviluppo del calcolatore elettronico fu il metodo del contatore, che consisteva nell'utilizzare l'impulso proveniente dalla camera, eventualmente amplificato, per azionare una cascata di coppie di relè telefonici, che demoltiplicavano l'impulso per 2, 4, 8, 16 ecc. (perciò si parlava di contatore a scala 2, 4, 8, 16 ecc.), terminando infine con un contatore meccanico che riportava un numero, che poi andava di nuovo moltiplicato per il numero delle demoltipliche (o "scalamenti"), restituendo il numero totale di impulsi.

La lentezza dei relè elettromeccanici utilizzati all'inizio per questa demoltiplica emerse prestissimo come un fattore fortemente limitativo del dispositivo, che lo faceva risultare utile solo per basse frequenze di impulso. Si cercarono allora dei sistemi che funzionassero come relè ma che fossero più veloci;²⁴⁰ perciò vennero adottate cascate di flip-flop, oppure un triodo riempito di gas come il "thyatron", inventato nel 1929 alla General Electric da A. W. Hull (1880-1966), il quale poteva essere usato in una maniera più o meno simile ad un relè [Hull 1929];²⁴¹ Il thyatron in particolare fu ampiamente utilizzato al Cavendish Laboratory per i contatori sviluppati da Charles E. Wynn-Williams (1903–1979), come emerge da una serie di studi pubblicati tra il 1930 e il 1934.²⁴² In seguito Wynn-Williams, oltre che continuare a sviluppare contatori veloci per la rivelazione nucleare, si impegnò nella costruzione dei sistemi crittologici inglesi.

Negli Stati Uniti lo stesso tipo di sviluppo coinvolse la National Cash Register (NCR), che nell'aprile 1938 allestì l'Electrical Research Laboratory [Desch e Mumma 1973]. In questo laboratorio un ruolo chiave ebbe l'ingegnere Joseph R. Desch (1907-1987), che si occupò dei contatori elettronici, sia per la realizzazione di contatori per la rivelazione che di calcolatori aritmetici veloci. Desch sarà anche il padre della Bombe navale statunitense, l'analogo del sistema di decrittazione escogitato da Alan Turing in Inghilterra.²⁴³

Fu essenzialmente l'esigenza di rivelatori che continuò a spronare nei primi anni della guerra la velocità dei circuiti di conteggio. Sul finire dell'estate 1940, l'NCR firmò con la

²³⁹ UK *patent GB 148582*; Eccles e Jordan (1919).

²⁴⁰ Cfr. Burcham 1989, p. 831; Price 1964, it., pp. 453-456.

²⁴¹ Su Hull, straordinario inventore di valvole e umanista, vedi la biografia di Suits e Lafferty (1970).

²⁴² Cfr. Wynn-Williams (1931, 1932, 1934); Wynn-Williams e Ward (1931).

²⁴³ Su questo cfr. i rapporti allora classificati entrambi classificati come "secret" di Desch (1942b), del 15 settembre 1942 e di Turing (1942) sulla visita alla NCR del dicembre 1942.

Sezione D3 (Instruments) dell'NDRC, diretta da George R. Harrison (1898–1979), un contratto per lo sviluppo di contatori elettronici ad altissime velocità per la rivelazione nucleare. Dopo un semestre il gruppo di Desch aveva sviluppato un contatore da 150.000 conteggi al secondo; e con un successivo contratto, questa volta in collaborazione con l'Università di Chicago, che aveva creato indipendentemente un contatore rapido ma binario, la velocità fu portata ad un milione e mezzo di conteggi al secondo [Desch 1942a, pp. 3-5].

Gli impulsi prodotti da una camera a ionizzazione sono casuali ed anzi queste camere costituiscono un buon sistema per ottenere dei generatori effettivamente random. Si comprese comunque presto che i contatori sarebbero potuti divenire il cuore di calcolatori aritmetici ad alta velocità. Ciò si ottenne essenzialmente con la sostituzione al posto della camera di ionizzazione di un generatore di impulsi a periodicità costante (che nella MIT Rapid Arithmetical Machine era detto “pulser”), seguito da una cascata di appositi demoltiplicatori [cfr. Desch 1942a, pp. 2-3].²⁴⁴ Al posto delle demoltipliche a base due si preferirono degli anelli [rings] decimali, un sistema che ritroviamo in uso negli Stati Uniti, all'MIT e alla NCR, ma anche presso gli inglesi, e che si ritroverà nell'ENIAC.

Questa tecnica utilizzava “banchi di triodi” cui furono dati vari nomi (“totalizzatori” all'MIT; “accumulatori” nell'ENIAC) composti da cascate di 10 flip-flop (coppie di triodi) a formare un anello indicante le cifre da 0 a 9, a seconda di quale flip-flop risultasse acceso; diversi anelli decimali venivano disposti a loro volta in cascata a formare un banco di anelli, in modo da rappresentare successivamente le unità, le decine, le centinaia e così via, del numero da rappresentare [cfr. Bush 1940, p. 338].

In questo modo per indicare un numero di dieci cifre occorreva un assemblaggio di 200 triodi; e dato che il “totalizzatore” non era usato solo come sommatore, ma anche come magazzino dei dati, in macchine che adottavano una architettura del tipo intravisto da Babbage, cioè in grado di conservare in qualche modo i risultati intermedi di una computazione, senza l'intervento umano, venivano richiesti numerosi banchi di triodi. Per esempio l'ENIAC prevedeva 18 accumulatori.

Ora, se si aggiunge a ciò il fatto che si pensava di utilizzare valvole anche per gli aspetti di controllo, si comprende come il loro numero nei progetti esplodesse rapidamente superando le decine di migliaia e ponendo perciò necessariamente dei problemi di affidabilità, vista la delicatezza del tubo termoionico, a vuoto o a gas che fosse. Per questo motivo in tutti i progetti di questo tipo diveniva fondamentale ridurre il numero dei triodi e la strategia normalmente seguita si concentrava sulla creazione di tubi speciali - a vuoto o riempiti di gas - che lavorassero o come un flip-flop in un solo tubo, o ancor meglio come un'intero anello decimale in un solo tubo; aumentando però il costo del sistema, visto che il triodo aveva una diffusione capillare nelle telecomunicazioni, mentre questi componenti avrebbero richiesto una costruzione *ad hoc*.

Dal 1938 una linea di ricerca su calcolatori elettronici digitali fu avviata dalla NCR. Vi si lavorò con grande lentezza, in parte per le interruzioni dovute alle esigenze governative di avere veloci contatori per la rivelazione nucleare, in parte perché, come sembra di capire dalle parole di Desch, non si vedeva chiaramente la prospettiva della commercializzazione di calcolatori aritmetici veloci. Nello stesso 1938 anche Samuel Caldwell, su suggerimento di Vannevar Bush, contattò la NCR per lo sviluppo della “MIT Rapid Arithmetical Machine”. Si fece un accordo con l'MIT con un sovvenzionamento del progetto da parte della NCR.

²⁴⁴ Il brevetto in questione dovrebbe essere *US patent nr. 2.403.852*.

Il progetto fu condotto - sempre sotto la supervisione di Caldwell - tra l'autunno 1938 e l'autunno 1939 da William H. Radford, che redigette diversi memoranda e rapporti.²⁴⁵ Da ampi stralci di un suo *memorandum* del dicembre 1938 apprendiamo le finalità della macchina:

«The Rapid Arithmetical Machine is intended to be an extremely flexible device for automatically and quickly performing extensive and complicated computations involving all combinations of the four fundamental arithmetical operations. [...] In executing a series of computations with numbers supplied to it, the machine will automatically perform all required intermediate operations of selection, transfer, totalization, and storage. Final or intermediate numerical results will be automatically recorded in one or more convenient forms. An essential feature of the machine will be its rapid operation. It is anticipated that it will be capable of performing elaborate arithmetical calculations one hundred or more times as fast as can be done with existing methods and equipment.»²⁴⁶

A proposito del progetto a questa fase di avanzamento, Desch riferisce che in un colloquio con Caldwell si era parlato di realizzare una macchina che implicasse «functional relationship such as trigonometric functions, that is, sines, cosines, tangents, etc.» [Desch 1942a, p. 7]. Secondo Radford la macchina non doveva essere portatile ma del tipo di cui dispongono i «centers devoted to computation and analysis — places where enormous amounts of computation must be carried on» [cito da Wildes e Lindgren 1985, p. 230]. Erano previste unità a tastiera per l'inserimento di numeri da trasmettere alla macchina tramite nastri, schede perforate o altri appositi dispositivi; un'unità di controllo per il controllo automatico di tutte le operazioni senza interventi esterni; sistemi per selezionare le relazioni funzionali da utilizzare. Doveva inoltre esservi una unità di calcolo aritmetica e varie unità per lo stoccaggio [*storage*] dei risultati temporanei; nonché una o più unità di registrazione [*recording*] dei risultati finali. [cfr. *ivi*]

La macchina era configurata dunque in maniera piuttosto simile all'Harvard Mark I e le finalità erano le stesse. L'unica importante differenza stava nella maggiore rapidità di calcolo permessa dalla tecnologia elettronica. In generale - spiega Desch -

«As Radford stated the design of such a machine must solve the problems of selection, transfer, storage, and totalization, and he recommended that the problem of totalization be attacked first». [Desch 1942a, p. 7.]

Il “totalizzatore” sarebbe stato del tipo ad anelli decimali [cfr. Wildes e Lindgren 1985, p. 230]. Quando lasciò il progetto, Radford consegnò un *memorandum* corredato di diagrammi, fotografie ed una rassegna della letteratura sui contatori elettronici per la rivelazione nucleare, raccomandando che fossero assegnate al progetto almeno due persone a tempo pieno [cfr. *ivi*, p. 231]. Venne anche organizzata una conferenza all'MIT alla presenza dei rappresentanti della NCR, dove si decise di nominare in sua sostituzione Wilcox Overbeck, un giovane che aveva ottenuto il BS all'MIT nel 1934. Overbeck continuò il lavoro di Radford dal 5 gennaio 1940 all'8 gennaio 1942.²⁴⁷

²⁴⁵ Desch riferisce di due rapporti inviati alla NCR da Radford: Radford, “Preliminary Investigation”, 1 maggio 1939; e Radford, “Report of Comprehensive Investigation”, 15 ottobre 1939 citato da Desch (1942a, p. 7). Randell (1982b) invece riferisce di un rapporto W. H. Radford, “Report on an Investigation of the Practicability of Developing a Rapid Computing Machine.” Cambridge, MIT, 15 ottobre 1939; Owens (1986, nota 40, p. 81) di un altro rapporto: W. H., Radford “Research on a Rapid Computing Machine,” ottobre 1939, copia ricevuta da Perry Crawford.

²⁴⁶ Citato da Wildes e Lindgren (1985), p. 230. Wildes e Lindgren ci informano che questo rapporto di Radford, di 88 pagine più appendice, è stato consegnato loro da Edward L. Bowles, [cfr. Wildes e Lindgren (1985), nota 2, p. 414]. Randell (1982b) cita di questo periodo anche il rapporto Radford, “Notes on Arithmetical Machine Memoranda.” Cambridge, MIT, 8 pp. Un resoconto più dettagliato dal punto di vista dei riferimenti è probabilmente costituito da Wildes (1971), che non è stato possibile consultare.

²⁴⁷ Sappiamo da Desch che Overbeck inviò alla NCR tre rapporti: Overbeck, Report of status and future plans for Rapid Arithmetical Research, 5 gennaio 1940; Overbeck, Counter Report, 15 ottobre 1940; Overbeck, “A new

Al tempo delle contese legali sull'ENIAC è venuto alla luce un prezioso *memorandum* di Vannevar Bush, dal titolo *Arithmetical Machine*, datato 2 marzo 1940 che fotografa nei particolari la fase di sviluppo del progetto di Overbeck a quella data [cfr. Bush 1940, p. 337]. La macchina prevedeva i totalizzatori decimali, che avrebbero consentito le quattro operazioni aritmetiche, lo stoccaggio di risultati parziali e la loro estrazione, per ulteriori manipolazioni nonché la stampa dei risultati finali. Essa prevedeva inoltre 3 nastri perforati, che sarebbero stati preparati in precedenza. Spiegava Bush che essi avrebbero potuto essere magnetici o di altro tipo, sebbene per il momento si pensasse semplicemente al tipo cartaceo. Il nastro A avrebbe contenuto i numeri su cui operare; il nastro B le costanti; il nastro C le istruzioni codificate per la macchina a seconda del problema dato. Si trattava di istruzioni del tipo: vai a leggere il tal numero sul nastro A o B o nel dato magazzino interno; fai la seguente operazione di addizione, sottrazione ecc.; colloca il risultato se provvisorio in un magazzino, altrimenti stampalo [cfr. *ivi*, pp. 337-8]. I problemi a cui si guardava erano evidentemente quelli posti dalla compilazione di tavole: il nastro C delle istruzioni avrebbe girato in maniera completa più volte, a fronte di piccoli spostamenti del nastro A, fino al completamento della lettura di esso.

Sarebbe stato adottato un “pulser” lento, da 10.000 impulsi al secondo. Bush stimava un tempo per la moltiplicazione di circa 1/5 di secondo, velocità che sembrava sufficiente in quanto la preparazione manuale dei dati per i nastri era considerata il collo di bottiglia principale [cfr. *ivi*, p. 341]

Il “pulser” in teoria poteva essere reso molto più rapido, come pure la velocità del nastro [cfr. *ivi*, p. 343] ma in fin dei conti non si sentiva il bisogno di una macchina più veloce. Questo calcolatore sarebbe servito per svolgere su scala industriale calcoli che in precedenza erano stati svolti a mano. Sarebbe stato adibito ai calcoli aritmetici e algebrici che non erano trattabili con l'analizzatore differenziale, finalizzato invece alla soluzione di equazioni differenziali ordinarie. Le esigenze principali dell'epoca erano quelle poste dalla compilazione di tavole di tiro e simili, ed un sistema più veloce non era ritenuto necessario.

In ogni caso Overbeck continuò a lavorare sodo concentrandosi sulla diminuzione del numero dei tubi per aumentare l'affidabilità complessiva del sistema, inventando tra l'altro un tubo dieci in uno, il “Digitron”, da usare come tubo di conteggio e come unità di immagazzinamento. Ne risultava comunque un contatore lento, secondo Desch, con una velocità di 2.500 conteggi al secondo [cfr. Desch 1942a, p. 8].

Infine il progetto fu bloccato completamente nella primavera del 1942, quando Overbeck fu chiamato a Chicago per lavorare per il Metallurgical Laboratory [cfr. Wildes e Lindgren 1986, p. 231].

Il progetto ebbe un'appendice con la Tesi di MS su “Automatic Control by Arithmetical Calculation” di Perry O. Crawford (1942), studente di Caldwell, che si proponeva di applicare il calcolo digitale elettronico ai predittori. Crawford vi utilizza la Tesi di MS di Shannon sull'algebra a relè ed i rapporti di Radford e di Overbeck.

Quando l'anno successivo comparve sul tavolo di Hazen, Direttore della Divisione 7 dell'NDRC, la richiesta da parte dell'Esercito di un finanziamento per l'ENIAC, questi chiese consiglio a Caldwell. Caldwell rispose stroncando il progetto. Asserì tra l'altro:

«we devoted about three years to research in basic circuits and components and were in the process of studying designs for the combination of such equipment into an overall machine when the work was suspended for the duration. [...] I make the above comments [...] to indicate our

high speed counter,” 8 gennaio 1942. E nel febbraio 1940 se ne aggiunse uno di Caldwell. Caldwell, “A proposal for a multi-total analysis machine using magnetic storage,” 7 febbraio 1940 [Desch 1942a, p. 7].

active interest in the Ordnance Department program because of its similarity to *the one which we have at present packed away in camphor balls*».²⁴⁸

Paradossalmente Caldwell bocciava il progetto dell'ENIAC, basandosi sull'esperienza maturata in un progetto simile che non sembrava essere risultato fallimentare. L'MIT Rapid Arithmetical Machine era stata solo messa "sotto naftalina" in attesa di tempi migliori. D'altro canto, sosteneva Caldwell, egli riteneva che in quella fase, in cui il Rockefeller Differential Analyzer era quasi ultimato, non ci sarebbe stato bisogno di un calcolatore digitale, che avrebbe comunque richiesto tempi lunghi e sarebbe stato utilizzabile solo a guerra finita. Incredibilmente Caldwell userà argomenti simili anche nel 1946 per dissuadere la Rockefeller Foundation dal finanziare il progetto dello IAS computer di von Neumann.

Il principale impedimento a scommettere sui calcolatori digitali elettronici era il fatto che non si vedevano scopi pratici per macchine così veloci, che d'altra parte richiedevano forti costi. Ciò emerge anche dal rapporto di Desch del gennaio 1942. Desch asseriva di sentire l'esigenza che la NCR accelerasse le ricerche sul calcolo elettronico impiegando più persone, ma tale preoccupazione sorgeva soprattutto dal timore che nel frattempo potesse emergere qualche concorrente in questo campo [cfr. Desch 1942a, p. 6]. D'altro canto egli vedeva in prospettiva solo la possibilità di applicarlo ad una macchina per l'analisi delle vendite, progetto peraltro sempre dilazionato per l'insorgere di incombenze più urgenti.

Accanto all'NCR e all'MIT, nel frattempo, si erano effettivamente affacciati sulla scena della ricerca sul calcolo digitale elettronico altri protagonisti. Era interessata ad essi la Radio Corporation of America (RCA), nella quale era attivo Vladimir K. Zworykin (1888–1982), l'inventore dell'iconoscopia televisiva e direttore dei laboratori per le ricerche sulla televisione a Camden nel New Jersey che, insieme a Jan Rajchman, aveva avviato nel 1940 il progetto per un predittore digitale elettronico richiestogli dal Frankford Arsenal di Philadelphia, non lontano dalla sede dell'RCA. La vicinanza geografica spiega anche la familiarità che si instaurò con von Neumann che era allo IAS di Princeton, e poi con la Moore School di Philadelphia [cfr. Rajchman 1980].

Per ridurre la quantità di tubi elettronici da impiegare, l'RCA aveva creato diversi sistemi *ad hoc*, in particolare utilizzando le tecniche connesse con i tubi a raggi catodici, sua indubbia specialità. Venne così elaborata una "resistive matrix" per le moltiplicazioni decimali e un tubo capace di eseguire calcoli aritmetici detto il "computron" [cfr. *ivi*].

L'RCA propose all'NDRC un contratto per un calcolatore elettronico vero e proprio [cfr. Rajchman *et al.* 1942]. Weaver rispose a Zworykin informandolo, al solito, dell'esistenza del lavoro di Caldwell all'MIT, nonché dell'esistenza dei predittori elettrici analogici dei BTL, e dell'impegno della Sezione D2 nel calcolo elettromeccanico. L'NDRC si disse interessata a finanziare la progettazione di alcuni componenti, piuttosto che un sistema completo.²⁴⁹ Fu perciò finanziato lo sviluppo del Computron, decidendo però in un secondo tempo di interromperne i finanziamenti [cfr. Hagemeyer 1979, p. 245].

Contemporaneamente l'Università di Chicago stava lavorando, con un contratto dell'NDRC, ad un "ratchet", uno tubo a raggi catodici che si riteneva potesse raggiungere velocità di calcolo enormi [cfr. Desch 1942a, p. 9]; anche la Eastman Kodak era interessata all'argomento e la General Electric stava sviluppando un thyratron. Il 4 Dicembre 1941 si tenne a Washington un convegno sui contatori [cfr. *ivi*, p. 6]. Ne seguì un altro nell'aprile 1942 a New York su "Electronic Fire Control Computers," organizzato dalla Sezione D2, a cui partecipò il

²⁴⁸ Memorandum di S.H. Caldwell a Harold L. Hazen, 23 ottobre 1943, NDRC. Cito da Goldstine (1973, p. 151), integrando la citazione con quella riportata da Wildes e Lindgren (1986, p. 231). Il corsivo è mio.

²⁴⁹ Cfr. Lettera di Weaver a Zworykin, 20 gennaio 1942. OSRD7, Office Files of Warren Weaver, Electronic Computers Folder. Citata da Mindell (1996, nota 48, p. 451).

Frankford Arsenal, la Sezione Controllo di tiro antiaereo del BuOrd, Zworykin dell'RCA, Samuel B. Williams e F. H. Hibbard dei BTL, Tuttle e Tyler della Eastman Kodak, Caldwell e Overbeck dell'MIT. La D-2 era rappresentata da Fry, Stewart, Stibitz e Caldwell [cfr. Mindell 1996, pp. 451-2].

Come nel caso dei calcolatori, anche in quello dei predittori l'utilizzo dell'elettronica trovò da parte dell'NDRC una energica opposizione. Come fa notare Mindell (1996), i contrari erano in realtà divisi in due: da un lato c'era chi come Hazen preferiva nettamente l'approccio analogico e dunque il ricorso ai "network analyzers" o agli analizzatori differenziali; c'erano poi coloro che, come Stibitz, accettavano l'approccio digitale, ma ne osteggiavano l'implementazione elettronica, adducendo questioni di affidabilità. Caldwell, nonostante la sua consuetudine con la MIT Rapid Arithmetical Machine, sosteneva una linea simile.

Il convegno di New York concluse che le possibilità di maggiore precisione che erano accordate dai predittori numerici elettronici non erano di grande importanza nei controlli automatici, laddove i sistemi non necessitavano di essere più precisi dei segnali di input o dell'utilizzatore di dati di uscita. Inoltre, secondo una tesi cara ai BTL, non era nemmeno certo che la minore affidabilità rispetto ai relè elettromeccanici avrebbe fatto sì che l'approccio digitale elettronico fosse vincente in termini di velocità e precisione sulle lunghe computazioni. Per quanto riguarda il calcolo automatico, per tutta la guerra la Divisione 7 dell'NDRC, dotata di una forte influenza anche su Weaver ed il Mathematics Applied Panel, sostenne risolutamente solo gli analizzatori differenziali e le macchine a relè dei BTL e dell'IBM.

L'avvio del progetto dell'ENIAC

Soltanto un progetto per un computer digitale elettronico riuscì, nonostante l'ostinata contrarietà dell'NDRC, ad essere messo in cantiere. Stiamo parlando dell'ENIAC (electronic numerical integrator and computer).

Come ci testimonia il capitano Herman Goldstine, con l'ingresso effettivo in guerra degli Stati Uniti, dopo Pearl Harbor, l'esigenza di completare le tavole balistiche e di bombardamento diventò impellente, sollecitando la ricerca di strumenti di calcolo più rapidi di quelli esistenti [cfr. Goldstine 1973, p. 138]. Secondo interessanti valutazioni di Goldstine si poteva stimare che per calcolare una traiettoria balistica di 750 moltiplicazioni, un uomo dotato di calcolatrice avrebbe impiegato 12 ore; all'Harvard Mark I sarebbero state necessarie 2 ore; alla macchina di Stibitz 40 minuti; 10-20 minuti all'analizzatore differenziale di Bush, sebbene con una precisione minore. Il progetto dell'ENIAC prometteva invece una velocità di calcolo mille volte maggiore e, considerando che una tavola di tiro conteneva circa 3.000 traiettorie, per completarne una, l'Analizzatore Differenziale avrebbe impiegato un mese, mentre l'ENIAC solo un paio d'ore [cfr. *ivi*, pp. 136-9].

Questi dati spiegano, da un lato, perché nel 1943 gli analizzatori differenziali, nonché le macchine dei BTL e dell'IBM, che avevano ormai una certa tradizione, in fin dei conti dessero un certo affidamento all'NDRC e, d'altro lato, servono anche a comprendere perché il Ballistic Research Laboratory (BRL) di Aberdeen, nel Maryland, incaricato di redigere tavole di tiro e di bombardamento e dipendente dall'Ordnance Department, cioè l'ente dello US Army per le forniture all'Artiglieria, con l'aumentare delle esigenze poste da una guerra guerreggiata si decise a promuovere il progetto di calcolatore elettronico digitale presentato dalla Moore School of Electrical Engineering dell'University of Pennsylvania, a Filadelfia, che prometteva una velocità straordinariamente maggiore.

Il rapporto di collaborazione tra BRL e Moore School era nato, verso la metà degli anni Trenta, con un contratto che prevedeva la costruzione di un Analizzatore Differenziale di Bush da parte della Scuola, a condizione che i progetti per una macchina simile potessero essere

utilizzati anche presso il BRL. Con l'inizio della mobilitazione, nel 1940, il BRL aveva ottenuto che l'analizzatore della Scuola fosse finalizzato alle proprie esigenze di calcolo e che agli stessi fini essa formasse e creasse squadre di persone addette al calcolo manuale munite di calcolatori da tavolo. Nell'autunno 1942 i BRL avevano posto il tenente e poi capitano Herman Goldstine, matematico esperto di balistica esterna,²⁵⁰ nel ruolo di ufficiale di collegamento per queste attività di calcolo tra il Laboratorio e la Scuola; la Scuola aveva affidato la responsabilità dei contatti con il BRL ad un proprio professore, John Brainerd, uomo con buone capacità organizzative ed una certa esperienza nel calcolo automatico sia analogico che digitale [cfr. *ivi*, pp. 133-4].

La Moore School, come molte altre realtà più piccole rispetto ai giganti che avevano dominato la prima fase dell'NDRC, ambiva ad aggiudicarsi progetti bellici significativi, un desiderio dal quale, prima dell'ENIAC, erano nati due contratti, le cui ricerche erano state svolte presso la scuola, ma che avevano dato occasione al suo staff – molti nomi del quale troveremo nel progetto per l'ENIAC – di avere scambi con l'MIT Radiation Lab. Un progetto riguardava un amplificatore a larghissima banda per il Rad Lab (il cosiddetto progetto PL), contemplante contatori elettronici e linee di ritardo, dove furono impegnati J. Presper Eckert (da non confondere con l'Eckert che aveva lavorato alla Columbia University), Chedaker e Sharpless. Ed ad un altro progetto dei Signal Corps, denominato PZ, a cui avevano lavorato John W. Mauchly e l'ingegnere Arthur Burks.

L'idea dell'ENIAC nacque da Mauchly, un fisico che aveva avuto modo di conversare nel 1941 con John V. Atanasoff presso l'Iowa State College, e che poi era stato assunto alla Moore School dopo un corso di formazione in elettronica. Il nome di Atanasoff è emerso nel corso dell'ultimo degli scontri legali per i brevetti del computer scaturiti dal 1945 in poi. Il giudice gli ha riconosciuto la priorità dell'invenzione, per aver realizzato tra il 1937 e il 1942, insieme al suo studente Clifford E. Berry, un piccolo calcolatore elettronico, l'Atanasoff-Berry Computer (ABC), finalizzato a risolvere grandi sistemi algebrici lineari, e basato su un dispositivo per somme e sottrazioni dotato di 300 tubi a vuoto, derivato dalla tecnologia della rivelazione nucleare.²⁵¹

Nel 1942 Mauchly scrisse una nota su "The Use of High-Speed Vacuum Tube Devices for Calculating" [cfr. Goldstine 1973, p. 149],²⁵² dove si insisteva sull'importanza della velocità e della precisione offerte dal calcolo aritmetico basato sull'elettronica, riproponendo principalmente le idee dedotte dai contatori per la rivelazione nucleare e insistendo sulla possibilità di utilizzare equazioni alle differenze per approssimare equazioni differenziali ordinarie. Mauchly discusse le sue idee con l'ingegnere J. Presper Eckert, che cercò la letteratura disponibile in materia [cfr. *ivi* e Goldstine 1977]. A parte gli studi di Bennet Lewis (1942) sui contatori elettronici e qualche altro testo analogo, Eckert non aveva a disposizione pubblicazioni sul calcolo elettronico in senso stretto.²⁵³ Sappiamo però che riuscì a procurarsi la tesi di *MS* di Perry Crawford,²⁵⁴ dove erano rifluiti i 4 anni di ricerche sulla MIT Rapid

²⁵⁰ La balistica si divide in interna ed esterna. La prima si occupa del moto del proiettile all'interno della bocca da fuoco; la seconda ne studia il comportamento dopo l'espulsione.

²⁵¹ I termini della disputa su EDVAC e ABC sono riassunti con abbondanza di particolari da Morelli (2001).

²⁵² Incluso come "Appendice A" da Brainerd in un rapporto per il BRL Aberdeen datato 2 aprile 1943. Secondo Goldstine, Brainerd venne a conoscenza del documento sono il 1° dicembre 1943.

²⁵³ Cfr. anche quanto scriveva nella sua tesi all'MIT Crawford (1942): «During the last five years Bush, Caldwell, Overbeck, and others in unpublished memoranda at the Massachusetts Institute of Technology have described methods of performing arithmetical operation with electronic devices. While no papers on this subject have appeared in the literature, workers elsewhere recently have made a number of contributions» [p. 3]; nonché la carenza di pubblicazioni notata in Desch (1942).

²⁵⁴ Cfr. J. P. Eckert riferendosi a prima del gennaio 1944 asserisce che "I had also read a Master's Thesis by Perry Crawford, at MIT» [J. P. Eckert (1980), p. 531]. Cfr. anche J. P. Eckert (1988).

Arithmetical Machine dal 1938 al 1942,²⁵⁵ nonché alcuni rapporti della NCR e ricerche della RCA [cfr. Goldstine 1977].

Ne emerse un progetto per una macchina sincrona dotato di un *pulser* da 100.000 impulsi al secondo e di un numero molto grande di componenti. Una macchina di 30 x 3 x 1 metri, con 18.000 valvole, 70.000 resistenze, 10.000 condensatori e 6.000 interruttori ed una potenza dissipata di 140 kilowatt [cfr. Burks 1947]. Il progetto iniziò a prendere forma sul finire del 1942, trovando un uditorio molto ben disposto, sia presso la Moore School che presso il BRL, nonostante qualche perplessità da parte di T. H. Johnson, l'esperto di elettronica del BRL, circa l'affidabilità di un aggregato di 18.000 valvole. Anche un alto dirigente dell'Ordnance Department come il colonnello Paul H. Gillon divenne un convinto sostenitore del progetto [cfr. Goldstine 1973, pp. 149-150].

Della stroncatura da parte della Divisione 7 abbiamo già detto. La Moore school aveva inoltrato una richiesta di finanziamento all'NDRC il 2 aprile 1943.²⁵⁶ Hazen la bocciò dopo essersi consultato con Caldwell e Weaver.²⁵⁷

Non riuscendo a forare questa granitica resistenza, l'Esercito minacciò di non accettare più nessuna tecnologia da parte dell'NDRC, ma alla fine il progetto dovette restare a totale carico dell'Ordnance Department. I lavori iniziarono verso la metà di maggio del 1943 [cfr. Brainerd 1976] e il contratto definitivo fu firmato il 5 giugno.²⁵⁸ Brainerd ne assunse l'incarico di responsabile amministrativo, J. P. Eckert di ingegnere capo e Mauchly ne fu il principale consulente, almeno nella prima fase, prima cioè che intervenisse la collaborazione di von Neumann. Le critiche da parte dell'NDRC continuarono a piovere anche nella seconda parte del 1943.²⁵⁹ Così Stibitz scriveva a Weaver il 6 novembre 1943:

«It was pointed out, I believe, in the memorandum sent to Colonel Gillon, that the speed of operation of a computing mechanism has, in itself, little significance. The essential problem is that of obtaining sufficient load-carrying capacity as economically as possible. Thus even though a particular machine may not be extremely fast, the load may be divided among several such units, thus obtaining all the overall speed that may be required. [...]

I see no reason for supposing that the relay device RDAFB is less broad in scope than the ENIAC, since each is a numerical calculator and can presumably perform exactly the same operations provided switching and storage problems in connection with the ENIAC can be solved. I think the ideal equipment would probably be a combination of relay and electronic devices, but I am very sure that the development time for the electronic equipment will be four to six times as long as that for the relay equipment.»²⁶⁰

L'RDAFB dovrebbe essere uno dei sistemi a relè dei BTL. Stibitz tendeva così a difendere con i denti la propria creatura, anche se con argomenti ragionevoli ed onestà intellettuale. È interessante notare come l'argomento principale vertesse sull'opposizione parallelismo/serialità, anche se si parla di un insieme di macchine piuttosto che di singole unità

²⁵⁵ Come osserva Ceruzzi (1998, nota 88, p. 322): «it appears that this thesis was partially the inspiration for work that Eckert later did at the Moore School».

²⁵⁶ Cfr. Brainerd (1981); Stern (1981, pp. 18-19).

²⁵⁷ Cfr. Harold L. Hazen, *Diaries*, 14 aprile 1943, (NARA) OSRD GP, Project #62, Box 46. Citato da Mindell (1996), p. 455 e Lettera di Caldwell a Warren Weaver, 15 maggio 1943, (NARA) OSRD GP, Ballistics, General Correspondence Folder, Box 80. Citato da Mindell (1996) p. 456.

²⁵⁸ Research Contract No. W-670-ORD-4926 tra tra gli Stati Uniti d'America e Amministrazione dell'Università di Pennsylvania. Citato da Goldstine (1973), p. 154, nota 10.

²⁵⁹ Diari di Harold L. Hazen, 5 marzo 1943 e 14 aprile 1943. (NARA) OSRD GP, Box 47. Division 7 Meeting Minutes. 6 ottobre 1943 e 3 novembre 1943. (NARA) OSRD GP, Box 72. Folder Division 7 Meetings; Harold L. Hazen a Edward Moreland, 10 maggio 1943. (NARA) OSRD GP, Box 46, Project#62. [Mindell 1996], p. 456.

²⁶⁰ Memorandum di G.R. Stibitz a W. Weaver, 6 novembre 1943. Cito da Goldstine (1973), p. 151-2.

aritmetiche interne alla stessa macchina. Il colonnello Gillon, d'altro canto, aveva già risposto a questa obiezione in anticipo scrivendo a Hazen il 7 ottobre 1943 nel seguente modo:

«The fact that the ENIAC is electronic in character will enable it to operate at a speed much greater than that of the RDAFB. Present indications are that [...] in the particular case of [fine p. 152] the exterior ballistic equations, the time for obtaining a result would be of the order of one minute, whereas the time required for the RDAFB for the same operation would be comparable to that of the Bush Differential Analyzer and would be of the order of 45 minutes. Consequently the strongest reason for the development of the ENIAC is the anticipated speed of operation».²⁶¹

Riducendolo al succo, il ragionamento di Gillon consisteva nel dire che, a conti fatti, per compensare ciò che si perdeva in velocità rinunciando all'ENIAC, sarebbero state necessarie almeno 45 macchine a relè dei BTL. Sarebbe un discorso convincente. Tuttavia si tratta solo del suo punto di vista economico, che poteva non coincidere con quello di un dirigente dell'AT&T, che avrebbe potuto vedere altresì un affare nella possibilità di vendere 45 macchine.

In ogni caso Caldwell giudicò il progetto arretrato rispetto ai precedenti progetti proposti da NCR, RCA e MIT, parere che coincideva anche con quello espresso dai ricercatori dell'RCA. Rajchman in particolare lo considerò "extraordinarily naïve".²⁶² D'altronde almeno alcune delle ingenuità di rivelarono vantaggiose. Analogamente a tutte le altre macchine di questo tipo si utilizzavano, sia come unità aritmetiche che di immagazzinamento dei dati numerici, banchi di anelli decimali (detti "accumulatori" nell'ENIAC). Piuttosto che ricorrere a costosi tubi speciali del tipo 10 in 1 o simili, per l'ENIAC si decise di utilizzare triodi commerciali a basso prezzo. Inoltre il metodo di riconfigurazione adottato era simile a quello delle centraline a spinotti dei sistemi IBM, ed era perciò molto meno flessibile del Rockefeller Differential Analyzer, che utilizzava una centralina di smistamento elettronica. D'altro canto i progettisti dell'ENIAC assicuravano che

«No attempt has been made to make provision for setting up a problem automatically. This is for the sake of simplicity and because it is anticipated that the ENIAC will be used primarily for problems of a type in which one setup will be used many times before another problem is placed on the machine».²⁶³

Queste "ingenuità" si spiegano soprattutto col fatto che i progettisti, lavorando in una maniera molto artigianale, ma non banale, privilegiarono la semplicità e i bassi costi, in vista di un impiego in tempi brevi. La velocità del sistema di riconfigurazione non era vista come prioritaria in quanto si prevedeva che i problemi da trattare sarebbero stati quelli tipici dell'Analizzatore differenziale, già in uso alla Moore School. Analogamente, piuttosto che puntare sull'uso di costosi tubi speciali, si pensò di utilizzare come unità di base flip-flop costituiti da coppie di triodi commerciali, montati in maniera tale da poter essere facilmente cambiati al momento del guasto. Il problema dell'affidabilità dell'enorme numero di tubi a vuoto così assemblati fu affrontato ancora con strategie di buon senso: si evitò di spegnere il calcolatore per eliminare i picchi dovuti ai transienti di accensione e spegnimento, e si mantennero molto al di sotto della soglia di operatività garantita dal produttore nel caso dell'impiego in un apparecchio radiofonico.²⁶⁴

Goldstine stima che la frequenza di guasti alla fine non superasse i 2 o 3 tubi a settimana, numero leggermente superiore a quello dei calcolatori a relè, ma – considerando l'alta velocità

²⁶¹ Lettera di Gillon a Hazen, 7 ottobre 1943, cito da Goldstine (1973), pp. 152-3.

²⁶² Rajman citato da Stern (1981, p. 44).

²⁶³ "ENIAC Progress Report." 31 Dicembre 1943 (UPA), cito da Stern (1981, p. 354).

²⁶⁴ Cfr. Goldstine (1973, p. 145) e Burks (1947, pp. 756-7).

dell'ENIAC – ne risultava una frequenza di guasti per operazione molto più bassa [cfr. Goldstine 1973, p. 145].

Problemi più complessi furono risolti mediante la cooperazione con diverse compagnie. Fu adottato un dispositivo utilizzato nel calcolatore dell'RCA ²⁶⁵ e la stessa RCA tenne lezioni al personale. Inoltre tra febbraio e maggio 1944, con la collaborazione dell'IBM, si dotò la macchina di dispositivi di input e output, adottando sistemi a schede perforate simili a quelli in uso sulle macchine IBM. Di lì a poco si sarebbero presi accordi con i BTL per dispositivi di controllo costituiti da relè elettromeccanici [cfr. Goldstine 1973, p. 164-5].

All'inizio di luglio del 1944, sulla macchina, iniziarono a funzionare due accumulatori che svolgevano addizioni, sottrazioni e riuscirono a risolvere delle equazioni differenziali del secondo ordine [cfr. Goldstine 1973, p. 164]. Questo momento, secondo Goldstine (1973), «roughly one year after its inception, was the watershed of the project. In that time the project had gone from a highly speculative idea to an engineering status that ensured its success.» [p. 164]

Pochi giorni dopo sarebbe giunto alla Moore School John von Neumann, ponendo ai progettisti dell'ENIAC i nuovi problemi che emergevano in relazione alla sua attività di ricerca presso Los Alamos.

²⁶⁵ La macchina conteneva una cosiddetta “tavola delle funzioni”, un modo per memorizzare una tavola numerica mediante una rete di resistenze e che fu utilizzata nell'ENIAC [cfr. Goldstine 1973, p. 163].

Capitolo 6 - Calcolatori e bombe atomiche

Un punto di svolta

Giunti al punto in cui si interrompe il precedente capitolo, cioè alla configurazione in cui si presentava l'ENIAC alla fine di luglio del 1944, normalmente le storie dell'informatica continuerebbero con il trattare dell'EDVAC, il cui *First Draft* del 1945 è considerato il primo esempio di computer moderno. Questo periodo rappresenta chiaramente una fase di svolta, che dal punto di vista della storia del progetto dell'ENIAC coincide con l'arrivo alla Moore School del matematico John von Neumann, portatore di nuove esigenze di calcolo provenienti dal Progetto Manhattan. Ora, però, la nostra ricostruzione diviene più articolata rispetto ad una classica storia del computer, perché è qui che l'evoluzione del calcolatore si viene ad intrecciare in maniera complicata con quella della Cibernetica. È lo stesso racconto di *Cybernetics* (1948) che ci conduce in questo intreccio. Nell' "introduzione" al libro, parlando di un periodo che deve corrispondere con il 1944, Wiener scrive:

«At this time, the construction of computing machines had proved to be more essential for the war effort than the first opinion of Dr. Bush might have indicated, and was progressing at several centers along lines not too different from those which my earlier report had indicated.

There was a continual going and coming of those interested in these fields. We had an opportunity to communicate our ideas to our colleagues, in particular to Dr. Aiken of Harvard, Dr. von Neumann of the Institute for Advanced Study, and Dr. Goldstine of the Eniac and Edvac machines at the University of Pennsylvania. Everywhere we met with a sympathetic hearing, and the vocabulary of the engineers soon became contaminated with the terms of the neurophysiologist and the psychologist.

At this stage of the proceedings, Dr. von Neumann and myself felt it desirable to hold a joint meeting of all those interested in what we now call cybernetics, and this meeting took place at Princeton in the late winter of 1943-1944.» [Wiener 1948, pp. 14-5]

Il passaggio citato è estremamente importante per la storia della Cibernetica, non fosse altro che per il fatto che le attività che vi vengono descritte culminano con il Convegno di Princeton, che Wiener considererà sempre come «the birthplace of the new science of cybernetics, or the theory of communication and control in the machine and in the living organism.» [Wiener 1956, p. 269]. A differenza di quel che scrive Wiener, tale convegno non si svolse, però, nell'inverno 1943-'44 ma in quello successivo, in particolare i giorni 6 e 7 gennaio 1945.²⁶⁶

²⁶⁶ Su tale ridatazione la letteratura è piuttosto concorde [cfr. Aspray 1990, note 46, 47, 48 p. 315; Heims 1980, p. 185; Hellman 1981, pp. 229-230; Piccinini 2003, p. 79], ci si può fondare anche su solide basi documentarie: la sintesi dell'incontro redatta da von Neumann e inviata ai partecipanti è datata 12 gennaio 1945 si riferisce al «meeting on 6-7 January in Princeton». Von Neumann invia a Wiener due copie della sintesi, con lettera di accompagnamento sempre del 12 gennaio 1945. Le date di tutte le altre lettere (custodite presso VNLC, WAMIT e HGAP) a cavallo tra 1944 e 1945 riferibili al convegno sono coerenti. Wiener in ogni caso non solo non ha corretto l'indicazione dell'inverno 1943-'44 nemmeno nella seconda edizione di *Cybernetics*, edizione emendata dagli errori che affliggevano la prima, ma ripropone la stessa datazione anche nell'autobiografia, anticipando di un anno rispetto alle fonti epistolari una serie di eventi descritti nelle lettere, come il suo soggiorno in Messico per partecipare al convegno della Mexican Mathematical Society a Guadalajara che Wiener colloca ostinatamente al 1944 [Wiener 1956, pp. 276 e ss.], ma la cui datazione al 1945 è altrettanto ben corroborata da varie lettere a von Neumann inviate nel corso del 1945, dalla data del convegno che si svolse tra il 28 maggio e il 2 giugno 1945 [cfr. *Science*, vol. 102, No. 2647, 21 settembre 1945, pp. 296-297]; allo stesso modo l'autobiografia fissa la crisi di coscienza di Wiener in conseguenza del bombardamento atomico del Giappone, alla fine del 1944 [cfr. Wiener 1956, pp. 293 e ss.]. Per tornare al convegno di Princeton il calendario perpetuo ci indica che il 6 e 7 gennaio 1945 erano un sabato e una domenica: fatto strano per le abitudini anglosassoni, ma forse coerente sia con il carattere informale e sostanzialmente segreto dell'incontro, come pure con la fretta che animava in quel periodo le attività di von Neumann.

Dobbiamo dunque situare cronologicamente l'andirivieni, le conversazioni di Wiener con Aiken, con von Neumann e con Goldstine, nel corso del 1944. Lo stesso Convegno di Princeton e le attività che ad esso seguirono si collocano nel momento nevralgico per la storia dell'informatica in cui von Neumann redigette il *First Draft* sull'EDVAC.

Purtroppo la documentazione che riguarda le attività svolte da Wiener nel biennio 1943-1944 è frammentaria. A questa situazione si sommano le misure di segretezza che avvolgevano, ed in parte ancora avvolgono, le ricerche del Manhattan Project, che costituivano la principale preoccupazione di von Neumann in questi anni. In questo capitolo e nel prossimo proveremo dunque a sbrogliare con pazienza la matassa, fino a giungere a comprendere, per quel che i documenti lo consentono, come si giunse al computer ad architettura von Neumann ed alla Cibernetica in tutta la sua interezza.

Per fare ciò è utile per prima cosa fare un passo indietro e tornare all'inizio della guerra, a quando cioè Norbert Wiener aveva inviato a Vannervar Bush quell'"earlier report" a cui egli accenna all'inizio del brano sopra citato.

"La macchina di Wiener"

Il 21 settembre del 1940 Wiener inviò a Vannevar Bush, da poco divenuto presidente dell'NDRC, una lunga e dettagliata lettera [Wiener 85a] con allegato un documento dal titolo *Memorandum on the mechanical solution of partial differential equations* [Wiener 85b].²⁶⁷ I due scritti riguardavano il progetto di una macchina di calcolo digitale, elettronica, ad alta velocità, a scopi speciali, per la soluzione automatica di equazioni differenziali alle derivate parziali [abbreviamo come EDP].

Wiener ci riferisce ampiamente del *Memorandum* nella lunga "Introduzione" di *Cybernetics*, in cui ricostruisce piuttosto dettagliatamente le vicende della Cibernetica *in fieri* fino al momento in cui viene scritto il libro, l'estate 1947. Leggiamo:

«I had known for a considerable time that if a national emergency should come, my function in it would be determined largely by two things: my close contact with the program of computing machines developed by Dr. Vannevar Bush, and my own joint work with Dr. Yuk Wing Lee on the design of electric networks. *In fact, both proved important.*» [Wiener, 1948, p. 3. Il corsivo è mio]

Non è documentato né un coinvolgimento diretto di Wiener nelle ricerche sugli aspetti digitale del programma di Bush all'MIT e nemmeno se ne fosse a conoscenza, anche se ciò sembra molto improbabile. Di fatto, però, nel 1940, l'attività di consulenza che Wiener aveva espletato per l'MIT nel campo del calcolo automatico fu riconosciuta e ufficializzata addirittura sul piano nazionale, ed in maniera da comprendere in primo luogo l'aspetto digitale. Infatti Wiener fu nominato "Chief Consultant" per le ricerche sul «calcolo (numerico, meccanico, elettrico)» [*Computation (numerical, mechanical, electrical)*],²⁶⁸ del *War Preparedness Committee* costituito tra le associazioni dei matematici statunitensi in vista della mobilitazione.²⁶⁹ Si deve considerare che "numerical" nel linguaggio del tempo, e sicuramente in quello di Wiener, significava "digitale", in quanto contrapposto a "based on measurement",

²⁶⁷ Nel seguito mi riferirò ad esso anche come *Memorandum sulle EDP*, o se il contesto non produce equivoci semplicemente come *Memorandum*.

²⁶⁸ "Report of the War Preparedness Committee [...]," in Morse (1940a e 1940b).

²⁶⁹ Cfr. Morse (1940a e 1940b). La sera di lunedì 9 vi fu la riunione congiunta dove fu presentato il War Preparedness Committee. La mattina e il pomeriggio di lunedì 9 si tenne l'incontro della MAA. L'incontro estivo dell'AMS si tenne da martedì 10 a giovedì 12 settembre 1940. I BTL misero a disposizione dei matematici presenti la loro «machine for computing with complex numbers», connessa via telescrivente alla macchina sita a New York nella sede dei BTL, messa a disposizione dei partecipanti tutti i giorni, dalle 11 alle 14. Cfr. Hollcroft (1940, p. 859-861).

cioè “analogico”,²⁷⁰ mentre è probabile che con “*mechanical*” si intendesse “automatico” – come accade nello stesso titolo del *Memorandum*, coevo alla nomina; con “*electrical*” si deve altrettanto probabilmente intendere “*electronic*”, termine più o meno intercambiabile nel linguaggio del tempo.

Il neocostituito *War Preparedness Committee* era stato presentato in occasione del Congresso estivo dell’AMS e della MAA, tenutosi al Dartmouth College di Hannover, tra il 9 e il 12 settembre 1940; era lo stesso congresso in cui fu reso pubblico il calcolatore a relè di Stibitz.²⁷¹ Il Comitato, creato dalle associazioni dei matematici e degli statistici americani, si sarebbe articolato in tre sottocomitati: uno riguardante la ricerca matematica indirizzata alla «solution of mathematical problems essential for military or naval science, or rearmament» [Morse 1940a e 1940b], e gli altri due con funzioni di supporto e di formazione. Il Sottocomitato per la Ricerca - diretto da Marston H. Stone, che era anche il *General Chairman* di tutto il Comitato - oltre a Wiener annoverava come capo consulenti: John von Neumann (IAS), per la balistica; Harry Bateman (CalTech) per l’aeronautica; Thornton C. Fry (BTL) per l’industria; Samuel S. Wilks (Princeton University) per la probabilità e la statistica e Howard T. Engstrom (Yale University) per la crittoanalisi [cfr. *ivi*].

Il *Report on War Preparedness Committee* asseriva che i capo consulenti sarebbero stati responsabili delle ricerche nelle rispettive materie per conto del Research Committee, ma senza assumere alcuna funzione direttiva in esso [cfr. *ivi*]. Comunque si trattava di incarichi importanti e gli studiosi indicati erano tutti tra i massimi esperti nel settore matematico indicato, ambito nel quale la guerra li avrebbe visti in prima fila: dobbiamo presumere dunque che ciò valesse anche per Wiener.

Era naturale che Wiener, capo consulente “for computation”, fosse in quell’occasione tra i più interessati a valutare le prestazioni del calcolatore di Stibitz. Ciò spiega un aneddoto riferito da John Mauchly, allora solo un giovane fisico inesperto di calcolatori, che vagando per la *hall* del Congresso vide Wiener che si agitava alle prese con la macchina di Stibitz.²⁷² E fu evidentemente sempre nella stessa veste che Wiener redigette il progetto sul calcolatore per le EDP inviato qualche giorno dopo a Bush.

Sul problema di trovare un metodo per la soluzione automatica delle EDP Wiener rifletteva da quasi dieci anni. Il primo spunto gli era venuto dallo stesso Bush, che gli aveva chiesto di pensare ad una possibile estensione alle EDP dell’analizzatore differenziale, che era limitato alle equazioni differenziali ordinarie.²⁷³

Tutti i tentativi di Wiener di estendere alle EDP l’approccio analogico di Bush erano però abortiti; l’ultimo in ordine di tempo risaliva al soggiorno di Wiener come *Visiting Professor*, nell’A.A. 1935-36, presso la Qinghua University di Pechino, dove lavorò insieme al suo ex allievo Yuk Wing Lee.²⁷⁴ Da tempo Wiener aveva inquadrato la questione intuendo che avrebbe dovuto utilizzare qualcosa di simile alla procedura dello *scanning* televisivo. Nei

²⁷⁰ Leggiamo in *Cybernetics*: «the central adding and multiplying apparatus of the computing machine should be *numerical*, as in an ordinary adding machine, rather than on a basis of *measurement*, as in the Bush differential analyzer.» [Wiener 1948, p. 4].

²⁷¹ Apprendiamo dai resoconti sul Convegno che, tra le altre cose, in quella sede era stato concesso un finanziamento fino a 10.000 dollari da parte della Carnegie Corporation e per il tramite del Committee on Scientific Aids to Learning in favore della *Mathematical Reviews* «for microfilm reading machines». Si trattava di uno dei tanti progetti riferibili al Bush Rapid Selector che si stava sviluppando all’MIT. Cfr. [Hollcroft 1940].

²⁷² Dobbiamo questo racconto a Henry Tropp che lo ha ascoltato da Mauchly; cfr. Tropp (1985, p. 120); Wiener (1956, pp. 229-232). Sulla macchina di Stibitz, cfr. Masani (1990, p. 172), Pratt (1987, it., pp. 189-192); Williams (1985); Stibitz (1985, p. 481).

²⁷³ Cfr. Wiener (1958, p. 110 e 1956, p. 137).

²⁷⁴ Cfr. Wiener 1956, pp. 189-191. Wiener fu in Cina dal 15 agosto 1935 al 19 marzo 1936, cfr. Hongsen (1996), poi si recò in Europa, per poi riprendere l’insegnamento all’MIT l’a.a 1936-37. Sul soggiorno di Wiener alla Qinghua (o Tsing Hua) University di Pechino Hongsen (1996), Montagnini (2007 tutto e 2005, pp. 83-4).

tubi televisivi a raggi catodici, sia nell'iconoscopio, cioè il tubo per le telecamere, che nel cinescopio, quello utilizzato negli schermi televisivi, l'immagine bidimensionale è prodotta – in maniera ovviamente approssimata – dall'accostamento di una molteplicità di linee parallele. Così Wiener pensò che per rappresentare – ancora naturalmente in maniera approssimata – una funzione di due (o più variabili) la si poteva suddividere in tante funzioni di una variabile, da “scannerizzare” riga per riga, leggendo e scrivendo su un nastro magnetico o qualcosa di simile. Avrebbe infine scritto nel *Memorandum sulle EDP*:

«The fundamental difficulty in the solution of partial differential equations by mechanical methods lies in the fact that they presuppose a method of representing functions of two or more variables. Here television technique has shown the proper way: *scanning*, or *the approximate mapping of such functions as functions of a single variable*, the time. This technique depends on very rapid methods of recording, operating on, and reading quantities or numbers.» [Wiener 1985b]

Il ruolo metaforico rivestito qui dallo scanning televisivo corrisponde al tipico stile di pensiero di Wiener, che ebbe sempre bisogno di pensare in termini concreti, pratici, prima di salire sulle vette più astratte: «I do not have – confessava – the type of philosophical mind that feels at home in abstractions unless a ready bridge is made from these to the concrete observations or computations of some field of science.» [Wiener 1953, p. 214]. In ciò era verosimilmente molto diverso da Turing o von Neumann.

La procedura analogica perseguita nei primi tentativi utilizzava grandezze di intensità variabile anziché numeri, sebbene il metodo risolutivo proposto implicasse già la reiterazione dei dati, come quello digitale che sarà poi proposto nel *Memorandum* [cfr. Wiener 1956, p. 138]. Wiener però si rese conto che dato che la rappresentazione continua delle grandezze è affetta da errori di misura, la reiterazione induceva un accumulo eccessivo di errori [cfr. Wiener 1948, p. 26]. Questa considerazione fu uno dei principali motivi per cui, dopo l'insuccesso del 1935-36, egli si orientò verso la rappresentazione digitale. Scriverà in *Cybernetics*:

«It also became necessary to perform the individual processes with so high a degree of accuracy that the enormous repetition of the elementary processes should not bring about a cumulative error so great as to swamp all accuracy.» [ivi, p. 4].

Dopo il Congresso al Dartmouth, Wiener si affrettò a buttar giù la nuova proposta, per rispondere ad una esplicita richiesta pervenuta dall'NDRC di ricevere progetti a fini bellici, come contemporaneamente fece circa i predittori [cfr. *infra* capitolo 2]. Tornando dal Congresso, come racconta nell'autobiografia del 1956, lavorò al progetto per il computer digitale per le EDP, discutendone con Norman Levinson [cfr. Wiener 1956, p. 232], ma probabilmente anche con altri matematici, e poi con alcuni colleghi ingegneri [cfr. *ivi*, p. 238]. Nella lettera a Bush, Wiener presenta nel seguente modo il funzionamento della macchina:

«This device solves a partial difference equation involving the time, and asymptotically equivalent to a partial differential equation involving the time, yielding for infinite time a purely space partial differential equation which may be of very different forms. This partial difference equation is solved by an apparatus which repeatedly scans a collection of data recorded on some very inexpensive device and replaces these data by new data.» [Wiener 1985a, p.122].

Il metodo numerico impiegato era simile a quello proposto nell'articolo su “Nets and the Dirichlet problem,” scritto da Wiener in collaborazione con il matematico dell'MIT Henry Bayard Phillips [Phillips e Wiener 1923], dove si dimostrava «the potential problem to depend on a infinite sequence of averagings» [Wiener 1958, p. 112]. Nella sostanza i dati discreti erano come sparsi su una regione piana – o, se necessario, a più dimensioni – a formare un lungo reticolo quadrato; poi venivano letti linea per linea, operando la media dei punti ai nodi delle

maglie del reticolo, riscrivendola sul nastro e reiterando la procedura.²⁷⁵ Secondo Randell questo metodo coincide con la “relaxation” introdotta da Southwell e Christopherson. Sennonché la “relaxation” si iscriveva a sua volta in una tradizione di metodi numerici iterativi della quale l’articolo di Wiener e Phillips rappresentava una delle primissime tappe.

Il *Memorandum* di Wiener si concentrava su una configurazione per una macchina particolarmente adatta a trattare il problema del potenziale ed in generale problemi di tipo ellittico. Nel preambolo si affermava:

«The projected machine will solve boundary value problems in the field of partial differential equations. In particular, it will determine the equipotential lines and lines of flow about an airfoil section given by determining about 200 points on its profile, to an accuracy of one part in a thousand, in from three to four hours. It will also solve three-dimensional potential problems, problems from the theory of elasticity, etc. It is not confined to linear problems, and may be used in direct attacks on hydrodynamics. It will also solve the problem of determining the natural modes of vibration, of a linear system.» [Wiener 1985b, p. 125].

In generale, Wiener pensava che la macchina potesse essere facilmente riconfigurata in maniera tale da essere adatta a trattare i tre classici tipi di problemi concernenti EDP, iperbolico, parabolico ed ellittico. Sarebbe stata anche adatta per la soluzione di «many non-linear problems such as those of hydrodynamics, and many problems of higher order, such as those of elasticity» [ivi]. Verso la conclusione, il *Memorandum* aggiungeva:

«If machines of this sort can be devised, they will be of particular use in many domains in which the present theory is computationally so complex as to be nearly useless. This is true of all but a few of the simplest problems in hydrodynamics. Turbulence theory, the study of waves of shock, the theory of explosions, internal ballistics, the study of the motion of a projectile above the speed of sound, etc., suffer greatly for the lack of computational tools. There are many cases where our computational control is so incomplete that we have no way of telling whether our theory agrees with our practice.» [ivi, p. 134].

Si spiegava, anche, che la macchina poteva essere utile per ottenere la soluzione di molti problemi implicanti equazioni differenziali ordinarie, laddove evidentemente si richiedeva una precisione o una velocità maggiori, rispetto all’analizzatore differenziale. Comunque la preoccupazione principale di Wiener era data dalla consapevolezza delle difficoltà in cui si dibattevano a quel tempo i settori scientifici implicanti le EDP, per le quali in moltissimi casi non erano disponibili metodi risolutivi analitici, oppure si veniva rimandati a metodi numerici intrattabili con gli strumenti disponibili. Gli scopi applicativi militari del progetto erano espliciti e riguardavano soprattutto l’aeronautica e la balistica.

L’architettura della macchina era stata modellata sul metodo numerico prescelto e sulla necessità di avere la massima velocità di calcolo possibile, onde affrontare l’enorme quantità di risultati intermedi che la procedura computazionale avrebbe prodotto. La macchina consisteva in un nastro magnetizzabile infinito, cioè a circuito chiuso, composto di 10 piste (o più, a seconda dei problemi) su cui erano imprimibili trasversalmente 1.024 valori numerici in notazione binaria, che dovevano essere scritti, letti o cancellati mediante un dispositivo di scrittura, lettura e cancellazione rapido, connesso ad una rapida calcolatrice aritmetica elettronica binaria, i cui risultati erano riportati sulla parte riscrivibile del nastro.

In particolare ad una prima parte del nastro, lunga circa un terzo del totale, era assegnato il compito di conservare per tutto il corso dell’elaborazione i dati al contorno e/o iniziali del problema, mentre il resto del nastro era predisposto per trattare i dati numerici intermedi, che sarebbero stati continuamente scritti, letti, cancellati e riscritti, fino alla conclusione del

²⁷⁵ Cfr. Masani (1990) p. 171, nonché Wiener (1956), pp. 138-9.

processo, che avrebbe presentato un nastro pronto per una stampa dei risultati in forma tabulare.²⁷⁶

Questo metodo produceva, come detto, una quantità enorme di valori intermedi. Per il caso assunto ad esempio illustrativo, che richiedeva una precisione dell'1 per 1.000, Wiener stimava che si sarebbero dovuti registrare in tutto, prima di giungere ai risultati finali, circa 140 milioni di valori numerici, molti dei quali sarebbero stati del tipo intermedio da cancellare. Stimava anche un tempo di computazione complessivo di circa 4 ore, risultato impensabile con le calcolatrici di cui si è parlato nel precedente capitolo, ma che egli riteneva possibile perché l'apparato era studiato per lavorare con la massima velocità in tutti i suoi aspetti, cercando di evitare qualsiasi collo di bottiglia.

Riguardo alla velocità computazionale – secondo uno stile di pensiero tipico di Wiener, che tendeva sempre a ricondurre le tecniche, matematiche o ingegneristiche che fossero, ad una visione filosofica generale – il *Memorandum* proponeva la seguente riflessione:

«There are thus three equivalent ways of improving computing apparatus: improvement in accuracy, number of parts, and speed. Of these, at our present stage of progress, improvement in speed is incomparably the cheapest. By giving up our present dependence on mechanical parts of high inertia and friction, and resorting to electrical devices of low impedance, it is easy to perform arithmetical operations at several thousand times the present speed, with but a slight increase over the present cost. Where operations are so multiplied in number as is the case with partial differential equations as distinguished from ordinary differential equations, the economic advantage of high-speed electronic arithmetical machines, combined with scanning processes, over the multiplication of mechanical parts, becomes so great that it is imperative.» [Wiener 1985b, p. 133].

Per aumentare l'efficienza dei sistemi analogici si potevano rendere più precise le componenti meccaniche, oppure si poteva aumentare il numero delle macchine adottate. Al contrario, considerata la situazione della tecnologia a lui contemporanea, Wiener riteneva che la strada più economica fosse offerta dall'incrementare la velocità, elemento che nel caso della risoluzione di problemi implicanti EDP diventava addirittura "imperativo".

Per quanto riguarda la calcolatrice rapida da adottare, Wiener non entra in molti particolari architettureali. Dice di essere venuto a conoscenza dell'esistenza di calcolatrici aritmetiche in grado di lavorare a 50.000 operazioni al secondo. Su ciò non sappiamo di più. Si trattava chiaramente di calcolatrici derivate dai contatori per la rivelazione nucleare e, considerando che di lì ad un anno o poco più, i contatori della National Cash Register avrebbero raggiunto velocità di un milione e mezzo di impulsi al secondo e che, in aggiunta, a Wiener serviva principalmente un'addizionatrice (la divisione per quattro era ingegnosamente ottenuta omettendo di riscrivere le due cifre binarie meno significative), che è classicamente più rapida della moltiplicatrice, che operasse per giunta su cifre binarie, la stima delle 50.000 operazioni binarie al secondo poteva essere sembrata fattibile, sebbene avrebbe imposto una revisione dell'impostazione tipica di macchine come la MIT Rapid Arithmetical Machine. Si ricorderà che il *Memorandum* di Bush, qualche mese prima, aveva parlato di una velocità di 5 moltiplicazioni al secondo.

Per un'applicazione generale dei problemi trattabili dalla macchina, spiegava Wiener, sarebbero state necessarie «electronic machines capable of performing rapid sequences of operations such as addition and multiplication on the data read off, before printing the result on the binary scale» [ivi, p. 134]. Si osservava che queste calcolatrici «while perhaps expensive, are not often repeated, and their total cost need not be excessive» [ivi, p. 134].

²⁷⁶ In particolare, spiega Wiener, l'apparato di lettura e scrittura legge i valori ai quattro nodi del reticolo che circondano il punto dato dell'equazione alle differenze, ne fa la media, e sostituisce il valor medio come nuovo valore per questo punto.

Ritroviamo in quest'ultima richiesta una sostanziale differenza rispetto all'impostazione della MIT Rapid Arithmetical Machine, poi seguita nell'ENIAC, dove si tendeva anzi a massimizzare il numero delle unità di calcolo (dette rispettivamente "Totalizzatori" o "Accumulatori"), anche perché in queste ultime, questi dispositivi erano deputati ad essere, oltre che calcolatrici, anche delle memorie provvisorie per i numeri, funzione che nella macchina di Wiener spettava invece solo al nastro. Ed era al nastro che andavano le principali attenzioni di Wiener, in quanto era esso il luogo fisico in cui si svolgeva la maggior parte della computazione e che avrebbe rappresentato anche l'aspetto più critico in termini di eventuali errori di scrittura e lettura ed anche un dispositivo che si pensava più difficilmente velocizzabile, rispetto alla parte puramente elettronica. Se si era adottato un approccio aritmetico anziché analogico, come si è detto, era stato per diminuire l'accumulo di errori nella reiterazione. Ora la stessa adozione della notazione binaria era stata suggerita, ispirandosi alla macchina di Stibitz, in primo luogo dalla necessità di semplificare l'operatività del nastro onde evitare errori di scrittura e lettura.

La macchina descritta da Bush nel marzo 1940 adottava nastri perforati cartacei, su cui erano codificate istruzioni e numeri, sebbene Bush non avesse escluso *a priori* la tecnologia magnetica. Tra l'altro i nastri perforati cartacei erano già disponibili commercialmente, essendo quelli della tecnologia telegrafica. Wiener raccomandava, però, a Bush con forza di escludere l'uso della carta:

«I have here assumed a magnetical printing and scanning. It is perfectly possible to replace this by a photoelectric scanning combined with a printing by some such device as an electric spark. The difficulty in this latter case is that erasure is impossible and excessive quantities of paper tape must go to waste. However, you will see that the variations in method keeping the same idea are enormous» [ivi, p. 124].

Il metodo di scrittura con scintillatrice era escluso perché si desiderava evitare uno spreco enorme di carta, vista la mole impressionante di dati da immagazzinare provvisoriamente. Il nastro tendeva in questo modo a cambiare natura: nato storicamente nel telegrafo e poi nel computer di Bush per inviare e ricevere dati, nella macchina di Wiener esso diventava un dispositivo in cui dovevano avvenire anche sia lo stoccaggio provvisorio che la cancellazione dei dati, cioè era una "memoria" di lavoro a tutti gli effetti, sebbene nel 1940 il termine "memoria" fosse prematuro anche nel linguaggio di Wiener. Il *Memorandum* proponeva tra l'altro per il nastro una vasta gamma di tecnologie possibili:

«A. A quick mechanism for imprinting numerical values on a running tape. I suggest that these values be carried in the binary scale, as a number of lines on which a signal may be turned on or off, to represent a digit 1 or 0 in the corresponding place in the binary scale. The signal might be magnetic-either DC mark or an AC hum; mechanical – a puncture in paper made by a spark; *phosphorescent* – stimulated by light, *cathode rays*, or X-rays; a state of ionization in the tape – *stimulated by cathode rays*, light, or an electrostatic field; or it might be none of these.

B. A mechanism for reading four such imprinted values simultaneously at fixed stations on the tape as it moves by. Again, the reading may be magnetic, photoelectric, dielectric, or something still different.» [Wiener 1985b. Il corsivo è mio]

Tra le altre cose qui si vede come l'idea dello *scanning* televisivo era divenuta più di una semplice metafora, in quanto i raggi catodici usati per ionizzare una superficie venivano proposti come un concreto metodo di memorizzazione tra altri. Vedremo che memorie costituite da tubi a raggi catodici diverranno le principali memorie veloci dei primi computer in senso moderno.

Parallelismo e serialità in Behavior, Purpose and teleology

È interessante notare che nell'articolo "Behavior, Purpose and Teleology," uscito lo ricordiamo nel gennaio 1943, si ritornava sulle nozioni di velocità, parallelismo e serialità. Questi concetti erano utilizzati dagli autori per illustrare le differenze "strutturali", per così dire, di strategia "architetturale", che distinguono animali e macchine per produrre funzioni analoghe. Gli autori sostengono che nelle macchine elettriche la conduzione è soprattutto elettronica, mentre negli organismi i cambiamenti elettrici sono di solito ionici. Ed ancora che

«Scope and flexibility are achieved in machines largely by temporal multiplication of effects; frequencies of one million per second or more are readily obtained and utilized. In organisms, spatial multiplication, rather than temporal, is the rule; the temporal achievements are poor-the fastest nerve fibers can only conduct about one thousand impulses per second; spatial multiplication is on the other hand abundant and admirable in its compactness.». [Rosenblueth *et al.* (1943), p. 22]

Come si vede, molto suggestivamente, due anni dopo il *Memorandum sulle EDP* la "serialità" e la velocità di esecuzione divengono un principio strategico esteso a tutte le macchine dell'epoca, opposto a ciò che si riscontrerebbe negli animali, in cui sarebbe predominante l'operatività in parallelo. Si tenga conto che Wiener e Bigelow venivano ora da un biennio di ricerche a contatto con l'MIT Radiation Lab, dove erano state elaborate tecniche ad altissima frequenza per i dispositivi elettronici soprattutto nei radar. Sintomaticamente le differenze tra macchine e animali sono semplificate in questo articolo ricorrendo ancora al parallelo con le tecniche televisive. Leggiamo:

«This difference is well illustrated by the comparison of a television receiver and the eye. The television receiver may be described as a single cone retina; the images are formed by scanning-i.e. by orderly successive detection of the signal with a rate of about 20 million per second. Scanning is a process which seldom or never occurs in organisms, since it requires fast frequencies for effective performance. The eye uses a spatial, rather than a temporal multiplier. Instead of the one cone of the television receiver a human eye has about 6.5 million cones and about 115 million rods» [Rosenblueth *et al.* 1943, p. 22]²⁷⁷

Si osservi che in questo modo di ragionare Wiener e collaboratori non applicano un'approccio "continuo" in nessun caso, ma piuttosto uno "discreto" sia che si tratti di macchine – dove si vede il moltiplicarsi di parti discrete nell'unità di tempo – sia che si tratti di animali – dove si indica il proliferare di unità discrete nello spazio. Il ragionamento infine si chiude con uno sguardo alla robotica che coinvolge le funzioni cognitive:

«If an engineer were to design a robot, roughly similar in behavior to an animal organism, he would not attempt *at present* to make it out of proteins and other colloids. He would probably build it out of metallic parts, some dielectrics and many vacuum tubes. The movements of the robot could readily be much faster and more powerful than those of the original organism. Learning and memory, however, would be quite rudimentary. In future years, as the knowledge of colloids and proteins increases, future engineers may attempt the design of robots not only with a behavior, but also with a structure similar to that of a mammal» [Rosenblueth *et al.* 1943 p. 22. Il corsivo è mio]

Probabilmente anche in precedenza Wiener aveva ragionato su un parallelo tra macchine e sistema nervoso centrale, con riguardo alle funzioni cognitive superiori. In ogni caso, per quanto mi risulta, il passo citato rappresenta la prima testimonianza diretta (gennaio 1943) dell'interesse di Wiener per questo aspetto. Ricordiamo che la maggior parte dell'articolo è

²⁷⁷ Gli autori usano il termine "television receiver" che fa pensare al "cinescopio", cioè allo schermo televisivo più che alla telecamera (l'iconoscopia vero e proprio): il ragionamento resta comunque particolarmente suggestivo.

dedicata sì ad una riflessione sul sistema nervoso animale (in parallelo con le macchine), ma che questo riguarda essenzialmente nervi afferenti, deferenti e cervelletto, per studiare le modalità di espletamento dell'azione deliberata, mettendo tra parentesi il problema di come la deliberazione scaturisce.

Origini e conseguenze del Memorandum sulle EDP

Nel 1940, le proposte del *Memorandum sulle EDP* non vennero accettate dall'NDRC. «At that stage of the preparations for war – ci informa *Cybernetics* – they did not seem to have sufficiently high priority to make immediate work on them worthwhile.» [Wiener 1948, p. 4]. L'autobiografia di Wiener del 1956 conferma questo parere:

«Bush recognized that there were possibilities in my idea, but he considered them too far in the future to have any relevance to World War II. He encouraged me to think of these ideas after the war, and meanwhile to devote my attention to things of more immediate practical use». [Wiener 1956, p. 239]

Il fitto carteggio intervenuto tra Bush e Wiener tra settembre e dicembre conferma queste affermazioni: nonostante Bush trovasse interessante la proposta, la sua realizzazione pratica avrebbe richiesto tempi troppo lunghi e impegnato ricercatori necessari per rispondere ad esigenze più urgenti.²⁷⁸

La bocciatura di Bush al progetto di Wiener non ci stupisce più di tanto, se si considera che – come è emerso nel capitolo precedente – sarebbe stata solo la prima di una numerosa serie di stroncaure da parte dell'NDRC, specialmente da parte della Sezione D2, poi Divisione 7, nei confronti dei progetti per calcolatori elettronici. I membri dell'NDRC (possiamo immaginare - oltre a Bush - Hazen, Caldwell e Weaver) non erano di principio contrari all'approccio digitale e nemmeno a quello elettronico in assoluto (vedi gli impieghi di sistemi digitali elettronici nel campo dei radar e della crittologia), ma nell'arco degli anni di guerra non videro mai bisogni talmente urgenti da giustificare il finanziamento di progetti riguardanti l'applicazione in grande stile dell'elettronica al calcolo digitale; emblematico è il fatto che la stessa Rapid Arithmetical Machine di Bush e Caldwell, fu “messa sotto naftalina” e ciò nemmeno ad una data qualsiasi ma all'inizio del 1942, ovvero immediatamente dopo l'ingresso in guerra degli Stati Uniti; la medesima sorte dunque era toccata due anni prima al progetto di Wiener che, a ben vedere, non era stato completamente rifiutato, ma rimandato a dopo la guerra.

Restano intorno al *Memorandum* almeno due problemi storiografici da chiarire. Uno riguarda le fonti di ispirazione di esso, l'altro le sue conseguenze. Rispetto ad entrambi i quesiti, *Cybernetics* dà una risposta un po' sbrigativa:

«Nevertheless, they all represent ideas which have been incorporated into the modern ultra-rapid computing machine. These notions were all very much in the spirit of the thought of the time, and I do not for a moment wish to claim anything like the sole responsibility for their introduction. Nevertheless, they have proved useful, and it is my hope that my memorandum had some effect in popularizing them among engineers.» [Wiener 1948, p. 4].

Riguardo alle questioni di priorità, a cui Wiener ha sempre tenuto molto, seppure principalmente su un piano di riconoscimento simbolico e senza mai arrivare in tribunale, qui egli appare eccessivamente accomodante. Sorge il dubbio che non volesse versare altra benzina sul fuoco in un periodo in cui – scrive verso la metà del 1947 – era ancora viva la disputa sull'EDVAC tra von Neumann da un lato ed Eckert e Mauchly dall'altro; d'altronde, dopo Hiroshima e Nagasaki, Wiener aveva voluto prendere le distanze da tutto ciò che aveva a che

²⁷⁸ Vedi le lettere: Wiener a Bush del 20 e 23 settembre 1940; Bush a Wiener, 24 e 25 settembre; 7, 19 e 31 dicembre 1940, (WAMIT), Box 4, ff. 58; che sono citate da Piccinini (2003, p. 38 e note 30, 31 e 32 alla p. 38).

fare con i computer in quanto tali, preferendo tenerne conto solo per il nesso con lo studio del sistema nervoso centrale o per lo studio delle loro conseguenze socio-economiche.

Non c'è dubbio, però, che il progetto del *Memorandum* fosse molto originale. È vero che dal punto di vista tecnologico fa riferimento ad aspetti singoli già presenti nella tecnologia del tempo: la calcolatrice elettronica aritmetica, il sistema binario, il nastro leggibile, cancellabile e riscrivibile erano tutti elementi conosciuti. Tuttavia non erano stati raccolti insieme, né erano stati inquadrati attraverso la nozione di velocità, né tantomeno erano stati finalizzati alla soluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali.

La macchina di Stibitz era binaria, però era elettromeccanica, tecnologia della quale Stibitz restò sempre tenace sostenitore. I progetti di calcolatori digitali elettronici, persino l'ENIAC, prevedevano al contrario il sistema decimale, perché gli accumulatori non erano altro che la traduzione elettronica letterale delle ruote decimali di Pascal e Leibniz. C'è invero un'affinità con la macchina di Turing descritta in "On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem*" (1936). Tuttavia ho qualche difficoltà a seguire K. Ferry e R. E. Sacks (1985) quando dicono che quella del progetto di Wiener è una «classical Turing machine architecture». Di fatto non si può escludere che Wiener abbia tratto una qualche ispirazione dalle macchine di Turing. Come è noto, in una singola macchina di Turing è adottato un nastro riscrivibile infinito; nella macchina di Turing universale poi addirittura c'è una prima parte del nastro che resta immutata nel corso della computazione e nella quale è inciso il programma della macchina di Turing singola da simulare ed i dati su cui operare, mentre i dati provvisori della computazione sono impressi e cancellati in una parte successiva del nastro. Turing (1936) usa addirittura il termine "scanning". Però si trattava di una parola inglese che veniva usata anche in senso non tecnico e non necessariamente riferibile alle tecniche televisive o alla lettura e scrittura veloci. Anzi Turing non condividerà mai nemmeno la filosofia della velocità che invece aveva plasmato il *Memorandum sulle EDP*, filosofia che Turing riterrà frutto di una fissazione americana per le cose in grande, come scriverà nel 1947:

«From the point of view of the mathematician the property of being digital should be of greater interest than that of being electronic. That it is electronic is certainly important because these machines owe their high speed to this, and without the speed it is doubtful if financial support for their construction would be forthcoming. But this is virtually all that there is to be said on that subject.» [Turing 1947, p. 106].

In generale Wiener – ammesso che abbia conosciuto nel 1940 l'articolo di Turing, cosa probabile ma non certa – può essersi ispirato ad alcuni aspetti esteriori delle macchine di Turing, meno alla loro filosofia intrinseca. E, certamente, le macchine proposte da Wiener, almeno alla data del 1940, erano macchine a scopi speciali, non generali, non ispirate alla macchina universale di Turing, né alla macchina di Babbage.

Anche per quanto riguarda le sue idee sui metodi numerici da applicare, Wiener non era certamente solo. La linea di ricerca di Wiener che aveva preceduto il *Memorandum*, cioè il tentativo di trattare le EDP con un analizzatore differenziale era parallelamente perseguita in Gran Bretagna dal fisico e matematico Douglas Hartree (1897–1958), che diverrà nel dopoguerra uno dei principali registi della costruzione del computer inglese. A metà degli anni Trenta, Hartree - dopo una visita all'MIT - aveva costruito un analizzatore differenziale di prova con pezzi di meccano all'Università di Manchester; poi nel 1938, con il gruppo di H. S. W. Massey al Dipartimento di Fisica della Queen's University di Belfast, costruì un piccolo analizzatore differenziale per applicazioni a problemi di meccanica quantistica, in particolare alla cosiddetta equazione d'onda di Schrödinger per un sistema sferico simmetrico, un'equazione differenziale ordinaria del second'ordine [cfr. Massey *et al.* 1938]. Sul finire degli anni Trenta creò all'Università di Manchester un grosso analizzatore di Bush in

collaborazione con la Metropolitan-Vickers Electrical Co., sul quale approfondì le applicazioni degli analizzatori alle equazioni differenziali alle derivate parziali.²⁷⁹ Jack Howlett (1912–1999), che lavorò in quest’ultimo gruppo, ha dichiarato che durante la guerra provennero dal Progetto Manhattan, almeno due problemi implicanti EDP perché fossero fatti girare su questa macchina.²⁸⁰ In ogni caso Hartree penserà ad una macchina digitale solo dopo aver conosciuto il *First Draft* sull’EDVAC.

Riguardo al metodo numerico, Richard Southwell nel 1938 aveva pubblicato con il suo assistente Derman Christopherson (1915–2000) un primo articolo sulla *relaxation*.²⁸¹ È probabile persino che Wiener abbia conosciuto i dettagli del metodo di Southwell dallo stesso autore, visto che erano entrambi presenti al 5° Congresso Internazionale di Meccanica applicata, che si tenne proprio nel 1938, con sede a Harvard e all’MIT.²⁸² Però secondo la testimonianza di David M. Young, Southwell riteneva che «any attempt to mechanize relaxation methods would be a waste of time» [Young 1987, p. 119].²⁸³ Anche Zellini (1996, p. 70) ha scritto, ignorando però il *Memorandum* di Wiener, che

«Negli anni Quaranta erano conosciuti metodi di risoluzione numerica non automatizzati. Ad esempio, i *metodi di rilassamento* elaborati da Southwell e dalla sua scuola sembravano refrattari a qualsiasi tentativo di automatizzazione, almeno finché questa non fu realizzata nei primi anni Cinquanta».

Il citato congresso del 1938 deve tra l’altro aver avuto un ruolo significativo nella presa di coscienza da parte di Wiener circa l’urgenza e l’importanza della soluzione automatica di problemi implicanti EDP, perché vi si era discusso a lungo di matematica applicata e di aerodinamica. L’evento di maggior spicco fu rappresentato dal “Turbulence Symposium”, che Hunsaker e von Karman (1939), curatori degli atti, consideravano «not only the principal feature of this congress, but perhaps the Congress activity that will materially affect the orientation of the future research» [p. XIX]. Il “Turbulence Symposium” era stato organizzato da Ludwig Prandtl, con undici relatori, tra cui Norbert Wiener (1939a) e Geoffrey Ingram Taylor (1939). Era, ha notato Gianni Battimelli (1986 e 2002), la prima volta che un’intera sessione di un congresso veniva dedicata alla teoria matematica della turbolenza creata da Taylor, il quale ispirandosi a Wiener aveva introdotto in questo campo i metodi dell’analisi di Fourier.

D’altro canto questo stesso Congresso – l’ultimo grande congresso internazionale di meccanica applicata prima della guerra e per giunta dedicato in gran parte all’aerodinamica – permette di saggiare quanto scarsa fosse nel 1938 l’attenzione per il calcolo automatico. Gli unici contributi dedicati al calcolo automatico contenuti negli atti del congresso sono quelli dei discepoli di Bush, in particolare di Gordon Brown e Harold Hazen, sui calcolatori analogici. Vera e propria mosca bianca è la relazione di Mario G. Salvadori (1939). Questi non riuscì a

²⁷⁹ Cfr. Goldstine (1973), pp. 95-7; Hartree (1949), spec. cap. 3.

²⁸⁰ Entrambi i problemi erano stati portati in forma “non classificata” dal responsabile della missione inglese Peierl. Si trattava di una equazione differenziale alle derivate parziali non-lineare parabolica (del tipo diffusione), che si suppose essere relativa al processo di separazione dell’uranio mediante diffusione gassosa; ed un’altra relativa ad un’onda d’urto prodotta da un’esplosione sferica molto intensa. Cfr. [Howlett 1995].

²⁸¹ Cfr. [Randell 1985], 135. L’articolo cui Randell fa riferimento è [Christopherson and Southwell 1938], che sarebbe divenuto celebre soprattutto dopo la tesi di dottorato [Young 1950].

²⁸² Gli atti del congresso furono pubblicati come Den Hartog e Peters (1939). Southwell era stato membro del comitato internazionale organizzatore del congresso e vi tenne una relazione a cui si accenna nel “Report of the Secretaries”, [Hunsaker e von Karman 1939, p. XXI], ma che non compare negli atti ufficiali, nemmeno per il solo titolo. Wiener pubblicherà un entusiastico resoconto del Congresso per il notiziario dell’MIT [Wiener 1938a].

²⁸³ Curiosamente in questo articolo dove ricostruisce la storia dei metodi iterativi, Young dimentica di citare l’articolo di Phillips e Wiener (1923), a differenza di come aveva fatto nella bibliografia della sua famosa tesi di dottorato [Young 1950].

giungere in tempo negli Stati Uniti per il convegno, ma la sua relazione fu ugualmente accettata per la pubblicazione. In essa venivano presentate le attività dell'Istituto per le Applicazioni del Calcolo (INAC) di Mauro Picone presso il CNR italiano. Tra le altre cose vi si accennava ad un metodo di risoluzione numerica di problemi al contorno di equazioni differenziali alle derivate parziali mediante la riduzione di tali equazioni ad un sistema di infinite equazioni del tipo Fischer-Riesz, esposto da Picone nel 1938.²⁸⁴

Dunque è vero, sia per la parte tecnica quanto per quella matematica, che Wiener aveva riunito una molteplicità di elementi sparsi presenti nella sua epoca, ma tale opera di raccolta era stata di per sé della massima originalità. Wiener si augura in *Cybernetics* che il *Memorandum* sia stato utile agli ingegneri, tuttavia almeno fino al 1944 la “macchina di Wiener” non sembra sia stata presa in considerazione seriamente da nessuno. Un'unica eccezione sembra essere rappresentata da un progetto, apparentemente non realizzato, di cui parla Desch in un rapporto del gennaio 1942, dove si descrive una «sales analysis machine», che si imperniava su un «*high speed computer, with electronic counters as elements*», e che sarebbe stata dotata di «*a high speed tape scanner*» dotato di un «*“magnetic pin wheel” storage device*» [Desch 1942a, p. 3]. Però Desch lamenta che per ben due volte aveva dovuto interrompere il progetto, sotto la pressione di più urgenti doveri governativi. Infine Desch iniziò a lavorare per la “Bombe” della Marina americana, ed è probabile che anche questo progetto fosse stato “messo sotto naftalina” in attesa della fine della guerra.

D'altro canto Wiener ci informerà nell'autobiografia che «the actual development of the computing machine technique has proved the correctness of my surmise and that the high-speed computing machines of the present day follow very closely along the lines which I then suggested to Bush» [Wiener 1956, p. 138]; ed ancora che «apparently the devices I suggested in 1940 are substantially those which are now employed» [ivi, p. 239].

Ferry e Sacks (1985), esperti di calcolo numerico, sostengono e concordo in questo pienamente con essi, che «indeed, most of the elements of the von Neumann machine, save the stored program, are present in the memorandum» [ivi, p. 139].

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, l'evoluzione delle macchine di calcolo digitali effettivamente realizzate fino al luglio 1944, compreso lo stato dell'ENIAC a quella data, aveva avuto ben poco a che fare con il progetto di Wiener. Tutto cambiò però con l'arrivo di von Neumann alla Moore School all'inizio di agosto del 1944. Ancora Ferry e Sacks, sottolineando che von Neumann contemporaneamente era stato nominato capo consulente per la balistica, hanno supposto che tra i due scienziati fosse avvenuta una fecondazione reciproca.²⁸⁵ Che tra Wiener e von Neumann vi sia stato un rapporto di scambio scientifico prima, durante e dopo la guerra è assodato senza ombra di dubbio. Purtroppo non è possibile stabilire con altrettanta certezza in che modo e in quale misura Wiener abbia influenzato l'evoluzione delle idee di von Neumann sui calcolatori digitali. Tutto ciò che possiamo fare è offrire un quadro plausibile sulla base dei documenti esistenti.

²⁸⁴ Cfr. Salvadori (1939, pp. 261-262). Tornato in Italia il mese successivo Salvadori dovette ritornare negli Stati Uniti nel gennaio 1939, a causa delle persecuzioni antisemite. Dopo breve tempo divenne professore presso la School of Engineering and Applied Science della Columbia University di New York. Non tornò più in Italia nonostante il desiderio di farlo. Nel 1958 non gli fu concessa una cattedra a Palermo, nonostante avesse vinto il concorso, con la motivazione che il governo (fascista) nel 1940 gli aveva tolto la cittadinanza italiana. Cfr. il documentatissimo Williams e Nastasi 2007, nonché il necrologio Brockway (1997).

²⁸⁵ Al contrario, Randell (1985) pensa impossibile che il documento di Wiener abbia in qualche modo influenzato l'evoluzione dei calcolatori.

Von Neumann e il rapporto con Norbert Wiener

Von Neumann è uno dei personaggi chiave della storia della Cibernetica al pari di Wiener, ed in molte idee della Cibernetica si riconosceva, come scriverà in una lettera a Wiener del 4 settembre 1949:

«I hope I need not tell you what I think of “Cybernetics,” and, more specifically, of your work on the theory of communications: we have discussed this many times, I hope we shall discuss it many more times, and I have even published my “appraisal” (as a book review in “Physics Today”). Hardly any two people ever agree 100% on hardly anything, but I think that we agree more-than-average on this subject».²⁸⁶

È opportuno soffermarci sulla sua figura. Nato a Budapest, John von Neumann (1903-1957)²⁸⁷ aveva mostrato precoci e potenti doti di matematico. Studiò tra Budapest, Vienna, Zurigo e Berlino. A Berlino prese parte alle riunioni sulle applicazioni della matematica di un circolo che si riuniva intorno a Leo Szilard, insieme ad altri connazionali, come Eugene P. Wigner e Denes Gabor [cfr. Israel e Millan Gasca 2008, p. 31]. Specialmente i nomi di Szilard e di Gabor sono importanti nella storia della Cibernetica: il primo per aver introdotto in ambito fisico una interpretazione informazionistica dell'entropia, il secondo per essersi occupato di Cibernetica dopo la Seconda guerra mondiale.

A Vienna von Neumann frequentò il “Mathematische Kolloquium” di Karl Menger, a cui partecipava anche Kurt Gödel [cfr. *ivi* p. 34]. Nel 1925 ottenne la laurea in ingegneria chimica presso il Politecnico di Zurigo e, nel 1926, un *Ph.D.* in matematica all'Università di Budapest, discutendo una tesi su “La costruzione assiomatica della teoria generale degli insiemi” [von Neumann 1922], poi pubblicata nel 1928. Nell'estate e nell'autunno del 1925 visitò l'Università di Göttingen, dove divenne discepolo di David Hilbert (1862-1943), di cui condivise il programma formalista, tendente a fondare la matematica attraverso la metamatematica. Nell'A.A. 1926-27 risiedette a Göttingen con una borsa di ricerca annuale [cfr. Aspray 1990a, p. 8]. Diede un contributo significativo al programma di Hilbert con un articolo del 1927 in cui completava alcuni risultati di Wilhelm Ackermann. Si impadronì degli strumenti logici dell'approccio assiomatico di Hilbert, che applicò in questi anni alla teoria degli insiemi, alle ricerche sui fondamenti della meccanica quantistica e alla teoria dei giochi.

Nel 1928, al Congresso Internazionale di Matematica di Bologna, conobbe Oswald Veblen, che si adoperò per averlo negli Stati Uniti. Fu così che, dopo un quadriennio passato a metà tra l'Università Princeton e Berlino, nel 1933 si stabilì definitivamente presso il neonato Institute for Advanced Study (IAS) di Princeton [cfr. *ivi*, p. 11], dove occupò una delle prime quattro posizioni accademiche create, insieme a Veblen, James Alexander e Albert Einstein [cfr. *ivi*, p. 12]. L'IAS restò la sua definitiva sede fino alla sua morte.

Von Neumann era stato uno protagonisti del Congresso sull'epistemologia delle scienze esatte di Königsberg del 1930 dove Kurt Gödel aveva presentato i suoi risultati sull'incompletezza. Qui si erano confrontate le tre principali posizioni nella disputa sui fondamenti della matematica: la tesi logicista, rappresentata da Carnap; la tesi intuizionista, rappresentata da Arend Heyting, e infine quella formalista, sostenuta da von Neumann.²⁸⁸ Von Neumann fu il primo a cogliere in quella sede che i risultati di Gödel implicavano la sconfitta del programma di Hilbert [cfr. per esempio Israel e Millan Gasca 2008, p. 54]. Dopo di allora

²⁸⁶ Lettera di von Neumann a Wiener, 4 settembre 1949, WAMIT, cito da Aspray (1990a, nota 155, p. 327).

²⁸⁷ Cfr. su von Neumann sono sulla sua in figura in generale soprattutto Heims (1980), Macrae (1992) e Israel e Millan Gasca (2008); sul suo rapporto con il computer e la Cibernetica soprattutto Aspray (1990a).

²⁸⁸ Cfr. Israel e Millan Gasca (2008, p. 54). Gli interventi uscirono su *Erkenntnis*, rivista da poco fondata da Carnap, che sarebbe divenuta un importante strumento di discussione e trasmissione di idee del Circolo di Vienna.

von Neumann abbandonò definitivamente gli studi di logica, anche se il suo stile scientifico restò sempre caratterizzato dalla ricerca di una rigorosa sistemazione assiomatica delle materie di cui si venne occupando: la sistematizzazione rigorosa della meccanica quantistica, la teoria ergodica, la teoria dei giochi, ecc. Lo stesso atteggiamento mentale si ritrova nell'ambito della teoria dei calcolatori e nel suo modo di vedere la Cibernetica, che egli preferiva chiamare "Teoria degli automi", espressione che va intesa in senso simile, ma non identico, a quella divenuta canonica oggi.

Steve J. Heims (1980), in libro che ha una fondamentale importanza pionieristica per la storia della Cibernetica, ha presentato in parallelo le figure di Wiener e di von Neumann proponendo una lettura schematizzata dei loro stili scientifici secondo le opposte cifre di "caos e complessità" contro "rigore logico". Come tutte le semplificazioni azzeccate, tale interpretazione è risultata utile per aiutare la comprensione di aspetti trascurati del pensiero di Wiener, ma soprassiede anche su molte analogie, come sottolineato da Pesi Masani (1990), in una altrettanto importante monografia su Wiener.

È utile cercare di inquadrare chiaramente identità e differenze tra le personalità scientifiche dei due studiosi. Wiener, più anziano di von Neumann di nove anni, era stato discepolo di Bertrand Russell tra il 1913 e il 1915, nell'epoca in cui questi aveva appena ultimato insieme a Whitehead i *Principia*. Nel frequentare Russell, Wiener si era portato dietro l'impronta del primo pragmatismo americano, entro la quale si era formato ed i cui tratti caratteristici, erano «l'antifondazionalismo, il fallibilismo e la promozione di comunità critiche», nonché «la consapevolezza e la sensibilità nei confronti della radicale contingenza e casualità che segnano l'universo, le nostre ricerche, la nostra vita» [Bernstein 1991, it p. 288]. Perciò, nonostante si fosse impadronito degli strumenti logici di Russell, Wiener non ne aveva mai condiviso in maniera completa il progetto di fondazione logicista della matematica, attestandosi su un moderato fallibilismo più affine all'operazionismo di Bridgman, che Wiener ripropone in logica e in matematica. Entrato all'MIT nel 1919, Wiener aveva abbandonato la logica in maniera ancora più netta di von Neumann.

Durante il breve soggiorno a Göttingen del 1915, Wiener aveva seguito le lezioni di Hilbert, oltre a quelle di Edmund Husserl. Ma si trattava del periodo in cui Hilbert, dal 1904 al 1917 [cfr. Bottazzini 2000, p. 715], aveva messo da parte le questioni di logica e sui fondamenti della matematica, secondo l'approccio dei *Grundlagen der Geometrie* del 1899, che riprese solo dal 1917 in poi con la conferenza sull'*Axiomatisches Denken* [cfr. *ivi*]. Così Wiener non poté partecipare alla stagione assiomatica per eccellenza di Hilbert, che si svolge nell'arco degli anni Venti, senza dunque dividerne i fini - che non avrebbe comunque condiviso - e senza neanche poter impadronirsi dei raffinati strumenti della metamatematica hilbertiana, al contrario di Gödel, il quale avendoli condivisi li usò per dimostrare l'impossibilità del progetto del maestro, e di von Neumann, il quale vide nei teoremi di Gödel il crollo del mondo in cui aveva fino ad allora creduto.

Wiener poté solo accettare i risultati di Gödel come una conferma eseguita con mezzi rigorosi di un fallibilismo e finitismo in cui aveva sempre creduto, come fece nel saggio su *The role of the observer* (1936), scritto da durante il soggiorno in Cina, nell'A.A. 1935-'36, in cui discute i risultati sull'incompletezza di Gödel e il principio di indeterminazione di Heisenberg, aggiungendo - con riferimento al recente lavoro in meccanica quantistica di von Neumann - che quest'ultimo aveva «shown that [...] this is not the case, and that the indeterminacy of the world is genuine and fundamental» [p. 88]. È questa la prima volta che troviamo citato il nome di von Neumann negli scritti di Wiener, a riprova della vicinanza che si era creata tra i due, che probabilmente avevano già cominciato a dialogare tra loro da qualche anno, quando von Neumann aveva iniziato ad occuparsi dei teoremi ergodici, dunque di una materia come la

meccanica statistica che Wiener ha sempre avuto a cuore.²⁸⁹ È sintomatico che comunque si tratti di una citazione che riguarda una “indeterminazione fondamentale” piuttosto che la sottolineatura del rigore in matematica, così caro a von Neumann.

Nel 1937 Wiener, avendo in programma una conferenza alla John Hopkins University nel Maryland per il 23 Aprile 1937, chiede a von Neumann di poter passare a fargli visita lungo il tragitto. Il 28 marzo 1937 von Neumann lo invita “to stay several days,”²⁹⁰ e il 9 aprile 1937 aggiunge: «I am looking forward quite particularly to have another mathematical conversation with you».²⁹¹ Queste discussioni riguardavano quasi certamente la meccanica statistica e i teoremi ergodici, come si arguisce dal saggio di Wiener del 1938 su “The Homogeneous Chaos,” in cui il nome di von Neumann torna più volte.²⁹² Nel 1937 si era anche parlato di un possibile soggiorno di von Neumann come *visiting professor* in Cina, e Wiener si era affrettato a raccomandarlo al suo amico Lee, scrivendogli tra le altre cose che «Neumann is one of the two or three top mathematicians in the world».²⁹³

Questa stima non venne mai meno, anche quando nel dopoguerra il loro rapporto scientifico si interruppe e si ritrovarono su opposti fronti etici e politici. Nell'autobiografia Wiener considera ancora von Neumann, insieme a Hermann Weyl, come «due delle più grandi autorità della matematica moderna» [Wiener 1956, p. 192]. Si trattava di una stima ricambiata. Nel 1955 von Neumann scriveva di Wiener in una lettera riservata: «I have held him and his work in the highest esteem for almost three decades».²⁹⁴

Il matematico Stanislaw Ulam ha raccontato che Wiener e von Neumann intorno al 1938 avevano discusso del problema della turbolenza in idrodinamica e del suo trattamento numerico [cfr. Ulam 1980, pp. 93-4]. Considerando che il nome di von Neumann nemmeno compare tra i partecipanti al Congresso di Meccanica applicata del 1938, mentre quello di Wiener spiccava tra i relatori del “Turbulence Symposium”, sembra probabile che in queste discussioni fosse stato soprattutto von Neumann ad apprendere da Wiener. Ciò doveva valere non solo per il tema della turbolenza, ma anche per le questioni relative al calcolo numerico e alle macchine di calcolo. È da notare che, sempre nel 1938, von Neumann era stato uno dei relatori della Fourth Washington Conference on Theoretical Physics, un prestigiosissimo ed elitario convegno organizzato annualmente dalla cattedra di George Gamow presso la George Washington University in cui si era discusso della fisica della fusione nucleare nelle stelle, dove si era occupato in particolare delle elevatissime pressioni che si registrano all'interno delle stelle [cfr. Gamow e Tuve (s.d.) e Chadrasekhar *et al.* 1938].

Wiener, dal 1919 in poi, era stato a stretto contatto con ingegneri e fisici, e la sua matematica si era costantemente misurata con problemi applicativi, benché egli fosse prevalentemente mosso dal desiderio di estrarre dalle applicazioni una matematica che voleva restasse in qualche modo “pura” o quantomeno una teoria che fosse la più generale possibile. Conosceva anche in maniera molto intima problemi e soluzioni tecniche specifiche, in

²⁸⁹ Erano certamente in contatto dalla fine del 1933, come dimostrata la lettera di von Neumann a Wiener, 26 novembre 1933 (WAMIT), Box 2, ff. 38, citata da [Piccinini 2003, p. 37]. Ma è probabile che si siano conosciuti a Göttingen nel 1927, perché nel 1955 von Neumann asserisce che conosceva Wiener da quasi tre decenni, cfr. lettera di John von Neumann a Irving R. Goldstein, 17 agosto 1955 (VNLC), General Correspondence, Box 7 “Wiener”.

²⁹⁰ Lettera di von Neumann a Wiener, 28 marzo 1937 (WAMIT), cito da Heims (1980), p. 176.

²⁹¹ *Ivi.*

²⁹² Il nome di von Neumann vi compare quattro volte e alla nota 11 si dice che alcune idee erano emerse da conversazioni con von Neumann.

²⁹³ Lettera di Wiener a Lee, 4 maggio 1937 (WAMIT), cito da Heims (1980, p. 176-7). Seguirono due lettere più formali, una al presidente dell'Università di Pechino e una al direttore del dipartimento di matematica [Cfr. Heims 1980, nota 42 p. 465].

²⁹⁴ Lettera di von Neumann a Irving R. Goldstein, 17 agosto 1955 (VNLC), General Correspondence, Box 7, “Wiener”.

particolare nel campo delle tecnologie elettriche e del calcolo. L'esperienza di von Neumann, prima presso Hilbert e poi all'IAS, una istituzione esplicitamente votata alle ricerche teoriche pure, era stata di tutt'altro tipo. Perciò, come ha scritto Ulam (1980), «for many years von Neumann was very much a pure mathematician. It was only, to my knowledge, just before World War II that he became interested not only in mathematical physics but also in more concrete physical problems» [p. 95].

Mentre Wiener aveva sempre saputo che «there is nothing better than concrete instances for the morale of the mathematician» e che «some of these concrete cases are to be found in mathematical physics and the closely related mathematical engineering» [Wiener 1949b, pp. 1037-8], al contrario von Neumann fece, entusiasticamente, questa esperienza solo nel corso delle ricerche della Seconda guerra mondiale. Nel 1937 era divenuto consulente per il Ballistic Research Laboratory di Aberdeen, probabilmente per il tramite di Veblen [cfr. Aspray 1990a, p. 26], poi nel 1940 divenne membro della Commissione Scientifica del BRL, presieduta da Veblen [cfr. Goldstine 1973, p. 128]. Forse proprio la sua laurea in chimica industriale, ovviamente in unione con le sue competenze in matematica e fisica, lo condusse ad occuparsi di esplosivi.

Dal settembre 1941 al settembre 1942 von Neumann fu consulente della Divisione 8 (esplosivi) dell'NDRC, diretta da George Kistiakowsky, per il sottocomitato "Detonations and Shock Waves". Si occupò di esplosivi ad alto potenziale e di cariche sagomate [shaped charges],²⁹⁵ cioè di quelle cariche che concentrano la potenza esplosiva in una data direzione aumentando l'effetto di penetrazione. Dal settembre 1942 al luglio 1943 lavorò anche per lo US Navy Bureau of Ordnance. Nella prima metà del 1943 risiedette in Inghilterra ancora per ricerche sugli esplosivi [cfr. Aspray 1990a, p. 26]. Qui, oltre a consultarsi su questioni di fluidodinamica con G. I. Taylor [cfr. Hodges 1983 it, p. 391],²⁹⁶ von Neumann collaborò con il matematico John Todd, che stava allora organizzando il servizio di calcolo per l'Ammiragliato all'interno del Nautical Almanac Office, l'istituzione, cioè, che come abbiamo visto nel precedente capitolo, era stata la prima a sperimentare un'attività di calcolo a scopi scientifici mediante l'integrazione di macchine d'ufficio sotto la guida dell'astronomo Comrie [cfr. Comrie 1936]. Von Neumann fece a Bath²⁹⁷ le prime esperienze su calcolatori digitali e ne fu affascinato; nel dopoguerra scriverà a Todd: «It is not necessary for me to tell you what they [our pleasant meetings of 1943] meant to me and that in particular, I received in that period a decisive impulse which determined my interest in computing machines.» [Todd 1974, p. 526, nota 1]. Von Neumann fu talmente entusiasta da scrivere a Veblen, nel maggio 1943:

«I think that I see clearly that the best course for me at present is to concentrate on Ordnance work, and the Gas Dynamical matters connected therewith. I think that I have learned here a good deal of experimental physics, particularly of the Gas Dynamical variety, and that I shall return a better and purer man. I have also developed an obscene interest in computational techniques. I am looking forward to discussing these matters with you. I really feel like proselytizing—even if I am going to tell you only things which you have known much longer than I did.»²⁹⁸

L'esperienza che von Neumann deve aver fatto al Nautical Almanac Office non può essere minimizzata, vista la tradizione di questo centro di calcolo, che era servito da modello per i centri calcolo della Columbia University, di Harvard e dell'MIT. Tra questa esperienza e le altre che von Neumann avrebbe fatto di lì a poco, tutte in qualche modo riconducibili alle

²⁹⁵ Sono dette talvolta anche "cariche cave". Cfr. Gardner Johnson (1996).

²⁹⁶ Hodges è l'unico autore che io conosca che parli di un contatto in questo periodo tra von Neumann e Geoffrey I. Taylor; ed è poco noto che anche Taylor divenne poi consulente di Los Alamos: la sua prima visita fu del maggio 1944 ed era presente al Trinity test [cfr. Hawkins 1946, pp. 29, 91, 95 e 275].

²⁹⁷ Il centro era stato evacuato da Greenwich a Bath, a causa dei bombardamenti su Londra [cfr. Todd 1974].

²⁹⁸ Lettera di von Neumann a Veblen, 21 maggio 1943, citata da Aspray (1990 p. 27).

ricerche del Manhattan Project, di cui fu consulente dall'autunno del 1943,²⁹⁹ c'è una profonda continuità. In ogni caso dovrebbe essere chiaro al lettore che, a questa data, mentre von Neumann era appena un "apprendista" nel campo computazionale, Wiener – l'autore del *Memorandum sulle EDP* – poteva senza dubbio essere considerato come uno dei massimi esperti mondiali di calcolo automatico, in particolare per le equazioni differenziali alle derivate parziali; ed accadde che le finalità applicative per cui Wiener aveva pensato di stilare il suo *Memorandum* vennero al centro della scena nell'ambito del Progetto Manhattan.

Il Progetto Manhattan e Los Alamos

È necessario soffermarsi con una qualche precisione cronologica sul Progetto Manhattan, in quanto esso costituisce indubbiamente, almeno per il tramite di von Neumann, lo sfondo della Cibernetica *in fieri*. Dopo una fase di ricerca a largo spettro, sotto la supervisione dell'Uranium Committee, le attività per la costruzione della bomba atomica entrarono nella fase operativa sul finire del 1942. Il 17 settembre il compito di costruire le bombe fu affidato allo US Army, sotto la direzione del generale Leslie Groves, che l'avrebbe guidato da un ufficio di New York, il Manhattan Engineer District Office, da cui la denominazione.³⁰⁰

Il progetto si articolava in quattro sottoprogetti. Due riguardavano i metodi prescelti per la separazione isotopica dell'uranio 235: il metodo della diffusione gassosa, studiato alla Columbia University e posto sotto la direzione di Harold Urey, e il metodo elettromagnetico, sviluppato alla University of California a Berkeley, sotto Ernest O. Lawrence. Dopo la nomina di Groves, si iniziò la costruzione degli impianti industriali per l'applicazione dei due metodi a Oak Ridge, nel Tennessee [cfr. Frank *et al.* 1997].

Un terzo sottoprogetto, sviluppato presso l'Università di Chicago e posto sotto la direzione di Arthur H. Compton, riguardava la produzione di plutonio 239 mediante reattori a uranio naturale moderati a grafite. Dopo il risultato positivo ottenuto da Fermi in quella Università il 2 dicembre 1942 [cfr. Greco e Picardi 2005, p. 52], la cosiddetta "pila di Fermi", fu costruito un reattore di medie dimensioni a Oak Ridge, e dal gennaio 1943 in poi vennero realizzati reattori di dimensioni industriali a Hanford, nello Stato di Washington [cfr. Davis 1968, p. 211 e nota 5 alla p. 211].

Un quarto e ultimo sottoprogetto, infine, era relativo alla progettazione delle bombe vere e proprie. Inizialmente diretto anch'esso da Arthur Compton, esso passò ufficialmente a Robert Oppenheimer il 1° novembre 1942 [cfr. Davis 1968, pp. 151 e 166]. Le ricerche furono svolte nel laboratorio di Los Alamos, nel New Messico, nelle vicinanze di Santa Fé, allestito appositamente, che iniziò a funzionare nella tarda primavera del 1943 [cfr. Frank *et al.* 1997].

Il progetto Manhattan nel suo complesso era soggetto a criteri di sicurezza più rigidi di quelli da noi descritti per i primi due anni di vita dell'NDRC. Molta documentazione di quegli anni resta ancora sottoposta ad alti livelli di segretezza. Le stesse comunicazioni tra i direttori dei quattro sottoprogetti erano sottoposte a regole molto rigorose.³⁰¹ In ogni caso, all'interno del laboratorio di Los Alamos, fu consentito agli scienziati di poter cooperare in condizioni di libertà informativa che erano, per quanto possibile, simili a quelle che i fisici atomici avevano

²⁹⁹ Sappiamo da Von Neumann: «I have been connected with the Manhattan District since 1943 as a consultant of the Los Alamos Laboratory, and I spent a considerable part of 1943-45 there.» Statement of John von Neumann before the Special Senato Committee of Atomic Energy, il 31 gennaio 1946, [VNCW6, pp. 499-502].

³⁰⁰ Le informazioni generali sulla storia del Manhattan Project sono desunte, oltre che quando possibile da documenti originali, da Frank *et al.* (1997), Hawkins (1946), Davis (1968), Rhodes (1988), Fitzpatrick (1999), Maurizi (2004), Greco-Picardi (2005).

³⁰¹ Cfr. esempio la lettera di Groves ad Arthur Compton e Robert Oppenheimer, "Interchange of information between Chicago and Los Alamos", 17 giugno 1943, "secret", attualmente "unclassified and Publicly releasable." (LANLH).

conosciuto prima della guerra, caratterizzate da un ampio scambio interdisciplinare. Ciò si ottenne ricreando sul vasto territorio della “Mesa” occupato dal Laboratorio, una sorta di microcosmo dove, dopo attento scrutinio da parte dei servizi segreti, gli scienziati venivano ammessi a vivere, spesso con le famiglie, senza poter più uscire se non in casi eccezionali.

Il compito di Los Alamos consisteva nel progettare e allestire effettivamente le bombe, utilizzando il materiale fissile che sarebbe provenuto dagli impianti di Oak Ridge e Hanford nei successivi due anni.³⁰² Si trattava di costruire una bomba all’uranio 235, soprannominata “Little Boy”, quella che avrebbe poi distrutto la città di Hiroshima, ed una al plutonio 239, soprannominata “Fat Man”, che avrebbe distrutto la città Nagasaki. Edward Teller (1908–2003) era a capo di una piccola squadra che si occupava della bomba all’idrogeno, un terzo tipo di bomba in grado di sprigionare un’energia mille volte superiore, ma che ricevette bassa priorità, e che era basata sul principio della fusione nucleare dei nuclei leggeri indotta dalle alte temperature prodotte dall’esplosione di una bomba a fissione.

Come fosse possibile ottenere delle reazioni nucleari controllate era ormai noto e dimostrato dall’esistenza del reattore di Fermi; ma affinché si potesse ottenere una bomba, occorreva che la reazione fosse rapidissima, obiettivo che paradossalmente era molto più complicato del precedente. Per innescare una reazione a catena di tipo esplosivo, nel caso dell’uranio, a Los Alamos si adottò il cosiddetto metodo “*gun*”, che consisteva nello sparare un proiettile di uranio sulla restante massa di materiale fissile, rendendola critica in pochi istanti. Il metodo richiedeva il progetto della “pistola”, stimando la velocità del proiettile, e non pose problemi teorici e di calcolo eccessivamente complessi [cfr. Davis 1968, pp. 173-7].

Alla realizzazione della bomba al plutonio i responsabili di Los Alamos sembrano aver tenuto moltissimo, considerato l’impegno profusovi e l’altissima priorità che diedero a tutto ciò che la concerneva. Essa comportava questioni teoriche e di calcolo estremamente complesse, a cominciare dall’innescare. Si iniziò presto a dubitare che fosse possibile adottare il metodo “*gun*” e a pensare che sarebbe stato invece necessario introdurre quello dell’implosione, che comportava estreme difficoltà di realizzazione. Esso consisteva nel riunire la massa critica sparando verso il centro masse subcritiche di Pu239 disposte in diversi punti di una sfera. Dalla fine del 1943 gli studi sull’implosione ebbero a Los Alamos priorità assoluta.³⁰³ Dalla primavera 1944 vi lavorò la maggior parte del personale autorizzato della divisione Armamenti [cfr. Davis 1968, p. 231]. Nell’agosto 1944 quasi tutti gli scienziati di Los Alamos, circa mille, tranne Teller e coloro che dovevano raffinare i lingotti di uranio e sagomarli per Little Boy, furono inseriti nel programma di lavoro per l’implosione [cfr. *ivi*, p. 233]. L’efficacia dell’implosione non fu sicura al 100% finché non si poté effettuare il test di Alamogordo del 20 luglio 1945, con una bomba al plutonio completa, in scala 1:1, che esplose con successo, producendo la potenza sperata di 20 megatoni.

Le ricerche di von Neumann per il Los Alamos Laboratory

Il metodo dell’implosione era stato proposto a Los Alamos nell’aprile 1943 da Seth Neddermeyer [Davis 1968, pp. 179-181 e 228]. Quando John von Neumann arrivò a Los Alamos nell’autunno 1943 iniziò subito a lavorare su di esso.³⁰⁴ Le sue precedenti esperienze, dal convegno del 1938 sulla fusione stellare, alle ricerche sulle cariche sagomate e sulle onde

³⁰² Cfr. Robert Serber, “The Los Alamos Primer”. Inizialmente “Secret”. Dispense ciclostilate relative ai seminari introduttivi tenuti da Serber nell’aprile 1943 (LATVAS). Cfr. anche Davis (1968), p. 172.

³⁰³ Cfr. Frank *et al.* (1997) e Davis (1968, p. 229-230).

³⁰⁴ Cfr. Davis (1968, pp. 228-9). Secondo comunicazione privata di Nicholas Metropolis del 7 dicembre 1989 ad Aspray riguardo all’implosione «initial concern at the laboratory was for quick assembly because of predetonation but then von Neumann stressed the added advantage in an increase of material density resulting from the implosion.» [Aspray 1990a, nota 16 p. 259]

d'urto, al calcolo automatico, risultarono tutte estremamente utili in questo contesto. Secondo una prassi poco comune von Neumann fu autorizzato a risiedere solo a tempo parziale a Los Alamos, potendo muoversi con una certa libertà per il paese, per prendere parte a differenti progetti, che sembrano comunque tutti in qualche modo riconducibili ai problemi di Los Alamos; una situazione che durò fino alla fine della guerra [cfr. ad es. Davis 1968, p. 230] Come raccontano Nelson e Metropolis (1982, p. 352), Von Neumann «consulted for several government projects at such a pace that he seemed to be in many places at the same time.»

Tra la fine del 1943 e i primi mesi del 1944 von Neumann risiedette per qualche tempo a Aberdeen, dove si occupò di aerodinamica con von Karman, che faceva parte come lui del gruppo di consulenti del BRL. Ebbe anche un rapporto di consulenza con il BuOrd, mediante la Divisione 2 (Structural Defense and Offense/Effects of Impact and Explosion), diretta dal 1942 al 1944 da John E. Burchard, e dal 1944 al 1946 da E. Bright Wilson, e la Divisione 8 (Explosives)³⁰⁵ diretta da George B. Kistiakowsky dal 1942 al 1944 e da Ralph A. Connor dal 1944 al 1946. Negli archivi di Los Alamos si trovano, secondo Aspray, numerose minute di incontri di von Neumann con George Kistiakowsky, E. Bright Wilson e G. J. Kirkwood, e rapporti del sottocomitato su “Detonations and Shock Waves”.³⁰⁶ Inoltre vennero svolti esperimenti di aerodinamica in due laboratori inglesi, nel BRL e presso la “stazione” dell’AMP dell’NDRC all’Università di Princeton [cfr. Aspray 1990a, p. 26, 31 e nota 26 a p. 261].

Nelson e Metropolis (1982), ovviamente entro i limiti prescritti ancora oggi dalla *classification security* [cfr. p. 348], hanno spiegato che

«The implosion simulation required solution of hydrodynamic equations with shock-boundary conditions. The Euler and Lagrangian form, a second-order hyperbolic partial differential equation, was selected as most appropriate for numerical solution.» [p. 354] E che «the numerical procedure evaluated the differential equation for a sequence of points covering one-space dimension and then integrated ahead one step in the time dimension.» [p. 350].

La procedura numerica adottata appare molto simile a quella esposta nel *Memorandum sulle EDP*. Il nome di Wiener rientra anche in un altro contesto. Infatti per il calcolo della massa critica era stata utilizzata in un primo tempo «the differential-diffusion approximation», che però, «adequate for heat-transfer problems, was grossly inadequate for nuclear reactions» e sovrastimava il valor vero otto volte. Quindi si era adottata «the integral-diffusion equation, a form of the Wiener-Hopf equation», la quale però poteva essere «solved analytically for a half-infinite plane, but solution for finite boundary conditions required numerical methods» [Metropolis e Nelson 1982, p. 354]. Si consideri che giungere ad una stima precisa della massa critica, cioè della quantità di materiale fissile necessaria per ottenere una reazione a catena, e giungervi in tempi ragionevoli era vitale in una situazione in cui la produzione del materiale fissile stava procedendo in maniera estremamente lenta.

In ogni caso, anche per questo problema, come per lo studio dell’implosione, e poi della stessa esplosione delle bombe in atmosfera, era necessario ricorrere a procedure numeriche, che richiedevano una grande quantità di calcoli.

Per quanto riguarda la questione dei calcoli, nell’allestire il laboratorio di Los Alamos si era seguito l’approccio consueto tra i fisici teorici, che non aveva mai contemplato un massiccio

³⁰⁵ [Davis 1968], p. 230.

³⁰⁶ Cfr. Aspray 1990a, p. 26, p. 31, nota 6 a p. 257. Aspray rimanda a lettera di von Neumann a Jesse W. M. DuMond of California Institute of Technology, 14 aprile 1944 (VNLC); aggiunge «Some of this work was carried out under a contract the IAS received from the Applied Mathematics Panel in 1943 following a conversation among von Neumann, Weaver, and Richard Courant. The work involved both theoretical and computational aspects of shock collisions. Valentine Bargmann joined the project as von Neumann's assistant in 1944.» [Aspray 1990a, nota 26 p. 261, che rimanda alle lettere: von Neumann a Weaver, 23 agosto 1943 e 15 gennaio 1944 (VNLC)]

ricorso al calcolo automatico. D'altro canto già nella fase preparatoria di Los Alamos, nel 1942, che si era svolta presso l'Università di California a Berkeley, era emersa la necessità di svolgere lunghi calcoli e si era risposto a questo bisogno nel modo classico, allestendo una piccola squadra di addetti al calcolo - che si usava chiamare "computers" - muniti di calcolatrici da tavolo. Tale attività era stata seguita da due giovani fisici, Stanley Frankel e Eldred C. Nelson, e per questo motivo nell'allestimento di Los Alamos essi furono incaricati di ordinare calcolatrici da tavolo, tra cui le più veloci erano delle Marchants e delle Fridens a dieci cifre decimali [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 348], che in parte furono distribuite tra gli scienziati ed in parte vennero utilizzate per creare una squadra di addetti al calcolo, che per ragioni di sicurezza era inizialmente formata solo da alcune mogli degli scienziati e sul finire dell'estate fu integrata con personale dell'Esercito, sotto la direzione del matematico Donald Flanders.³⁰⁷

Nell'autunno del 1943, quando ancora si era alle prese con i calcoli per l'innescò *gun*, il fisico Dana Mitchell, responsabile delle forniture di Los Alamos, aveva suggerito di ordinare delle macchine IBM a schede perforate, ispirandosi al "Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau" della Columbia University, università da cui egli proveniva [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 350]. Frankel e Nelson furono incaricati di preparare una lista di apparecchiature e richiesero tre moltiplicatrici 601, ed altri sistemi tipici degli assemblaggi IBM, basati sull'elettromeccanica e le schede perforate.³⁰⁸ Queste macchine, sebbene non rappresentassero una risposta adeguata ai problemi che si sarebbero presentati di lì a poco, non arrivarono prima della primavera del 1944 [cfr. Fitzpatrick 1999, p. 64].

Fu nel gennaio 1944 che il problema dell'implosione fece emergere l'urgenza di avere veloci sistemi per il calcolo numerico automatico. Racconta Ulam:

«I participated, in January 1944, in some of these discussions with von Neumann and [il matematico Jack] Calkin and I well remember the schematized and over-simplified way by which one first tried to compute the course and results of implosions. From the beginning the schematizations seemed to me too crude and unreliable. I remember discussions with von Neumann in which I would suggest proposals and plans to calculate by brute force very laboriously—step by step—involving an enormous amount of computational work, taking much more time but with more reliable results. It was at that time that von Neumann decided to utilize the new computing machines which were "on the horizon."».³⁰⁹

In un'altra occasione Ulam ha aggiunto: «we received administrative support for getting all possible means to enable one to calculate implosions more exactly» [Ulam 1980, p. 96].

Il 28 gennaio 1944 Robert Oppenheimer inviò a S. L. Stewart un telegramma per sollecitare la fornitura IBM richiesta [cfr. Fitzpatrick 1999, p. 64]. Qualche giorno prima, il 14 gennaio, von Neumann aveva scritto una lettera a Warren Weaver in quanto capo dell'Applied Mathematics Panel, [cfr. Owens 1988, p. 291]³¹⁰ per chiedere informazioni sulle tecnologie di calcolo disponibili in quel momento.³¹¹ Nella lettera von Neumann non comunicava il motivo della sua richiesta e questa procedura di non svelare gli scopi, o almeno gli scopi veri, della

³⁰⁷ Il servizio di calcolo aveva la sigla T5. Cfr. Metropolis e Nelson (1982), p. 349; cfr. anche Hawkins (1946), p. 84.

³⁰⁸ Furono ordinate le seguenti macchine IBM: tre moltiplicatrici 601; una tabulatrice 402; un riproduttore di schede perforate; un verificatore; una perforatrice; un "selezionatore" [sorter]; una raccoglitrice. Cfr. Metropolis e Nelson (1982), p. 350.

³⁰⁹ Ulam (1969), cito da Aspray (1990a, nota 21 p. 260).

³¹⁰ Owens si basa soprattutto sulle lettere di Warren Weaver a Marshall Stone, 19 gennaio 1944, e di Bigelow a Weaver, 22 aprile 1944, in NARA, AMP.

³¹¹ Cfr. von Neumann a Weaver, 14 gennaio 1944 (UPA) citata da Stern (1981, p. 71). Si veda anche Stern (1980); cfr. anche i numerosissimi documenti citati su tutta la questione da Aspray (1990a, pp. 30-4 e note alle pp. 260-2).

propria attività fu seguita, per quel che se ne sa, con quasi tutti gli interlocutori esterni a Los Alamos, se non con tutti addirittura.

Weaver suggerì di contattare Howard Aiken a Harvard, George Stibitz dei BTL e l'astronomo Jan Schilt (1894-1982) della Columbia University.³¹² La risposta era pratica in quanto, come sappiamo, l'Harvard Mark I stava per essere ultimato, mentre gli altri tipi di macchine digitali allora attive erano quelle a relè dei BTL e gli assemblaggi a fini scientifici dell'IBM del "Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau", di cui Schilt era divenuto responsabile dopo il trasferimento a Washington di Wallace J. Eckert. Weaver non accennò all'ENIAC, di cui era informato sin dal 15 maggio 1943,³¹³ forse a causa del giudizio negativo che la Divisione 7 dell'NDRC aveva espresso su questo progetto; in ogni caso, nel gennaio 1944, l'ENIAC non era ancora operativo e a von Neumann servivano macchine funzionanti.³¹⁴

Quando finalmente in primavera arrivarono a Los Alamos le macchine IBM, si occupò del loro assemblaggio John Johnston, un militare che aveva lavorato per l'IBM, insieme a Frankel, Nelson ed al giovanissimo Richard Feynman. Il sistema IBM fu destinato alle computazioni per la simulazione dell'implosione, mentre i calcoli per l'innescò *gun* ed altri furono intrapresi dalla squadra munita di calcolatrici da tavolo [cfr. Metropolis e Nelson 1982, pp. 350 e 354].

La procedura numerica da adottare per l'implosione era pronta già prima della consegna delle macchine. La computazione avveniva più o meno in questo modo. Ogni scheda perforata rappresentava un punto di una linea, in modo che per rappresentare lo stato dell'implosione per ogni istante erano necessari numerosi mazzi di schede. Ogni passo di integrazione comportava la lettura di un mazzo di schede, i dati andavano ad una macchina addizionatrice e moltiplicatrice che perforava un nuovo mazzo di schede, ed i passaggi di schede andavano ripetuti per una dozzina di volte per ogni passo temporale. Nel corso della procedura occorreva anche riprogrammare le macchine mediante un nuovo cablaggio com'era tipico delle macchine IBM [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 350].

Questa procedura era impressionantemente simile al lavoro iterativo che Wiener aveva immaginato si dovesse svolgere sul nastro della sua macchina nel 1940, e che invece l'assemblaggio IBM richiedeva si dovesse trattare manipolando montagne di schede perforate. È naturale perciò che si siano cercati anche sistemi più veloci. In marzo vi furono diverse comunicazioni epistolari tra Weaver, von Neumann ed E. L. Chaffee, il capo di Aiken.³¹⁵ Aiken pose il problema della mancanza di personale. Tra giugno e luglio, Aiken e von Neumann si incontrarono, ed infine si pervenne ad un accordo secondo cui von Neumann avrebbe fatto preparare un problema a Valentine Bargmann dello IAS e a Charles Loewner della Brown University, mentre l'inserimento del problema sarebbe stato eseguito da Richard Bloch, assistente di Aiken.³¹⁶

³¹² Cfr. lettera di Weaver a Emory L. Chaffee della Harvard University, 22 marzo 1944; lettera di Weaver a J. von Neumann, 22 marzo 1944 (VNLC); lettere di von Neumann a Weaver del 27 marzo e del 28 giugno 1944 (HSRC). [Aspray 1990a] p. 30, nonché note 22 e 24 p. 260.

³¹³ Gli aveva scritto Caldwell: «There is a certain amount of agitation, coming primarily from Brainerd at the University of Pennsylvania, for the development of an electronic differential analyzer to do high-speed numerical integration. This is a huge undertaking. I doubt that it can be finished until five years after the war is over.» Lettera di Caldwell a Warren Weaver, 15 maggio 1943, (NARA) OSRD GP, "Ballistics, General Correspondence Folder, Box 80. Cito da Mindell (1996), p. 456.

³¹⁴ Aspray 1990a, p. 35 ha espresso quest'ultima opinione, sebbene consideri valido come co-fattore della decisione la scarsa opinione che del calcolo digitale elettronico avevano molti componenti della Divisione 7, come sostenuto da Stern (1981).

³¹⁵ Cfr. lettera di Weaver a Emory L. Chaffee della Harvard University, 22 marzo 1944; lettera di Weaver a J. von Neumann, 22 marzo 1944 (VNLC); lettere di von Neumann a Weaver del 27 marzo e del 28 giugno 1944 (HSRC). Aspray 1990a, p. 30, nonché note 22 e 24 p. 260.

³¹⁶ Aspray (1990a, nota 24 pp. 260-1), che rimanda a Bloch (1984, p. 12), il quale dichiara di essersi occupato della computazione senza conoscerne la natura.

In primavera von Neumann riferì a Nelson e Metropolis dell'esistenza dell'Harvard Mark I di Aiken e chiese loro di mettere sotto una forma "non classificata" un problema concernente l'implosione già in programma per le macchine IBM di Los Alamos. Ciò significava portare il problema all'esterno di Los Alamos in una forma tale che non fosse possibile arguirne la natura fisica. Come chiarisce, parlando di un altro problema che fu fatto girare sull'ENIAC, Herman Goldstine:

«The Los Alamos problem was classified as far as the underlying physical situation was concerned but not as regards the numerical or mathematical form of the equations to be solved. This policy of keeping the numerical equations unclassified was a wise one that was long maintained. It made possible doing calculations for Los Alamos without obtaining clearances for any of the personnel involved and without having to maintain elaborate security measures in the ENIAC room itself» [Goldstine 1973, p. 226].

La medesima computazione assegnata all'Harvard Mark I fu condotta contemporaneamente anche a Los Alamos ad insaputa del personale di Harvard. Essa richiese tre settimane a Los Alamos e quattro sull'Harvard Mark I, ma mentre la computazione di Los Alamos aveva 6 cifre decimali, quella di Harvard ne aveva 18, ed era in grado di integrare l'EDP con un passo temporale molto più breve:³¹⁷ performance dunque simili per macchine che erano diverse per architettura ma pur sempre elettromeccaniche. In ogni caso Los Alamos utilizzava tutte le risorse computazionali possibili, interne ed esterne, e le sole ricerche sull'implosione richiesero entro la fine della guerra complessivamente più di dodici computazioni.³¹⁸ Sappiamo che nell'aprile 1944 von Neumann incontrò anche Schilt, con il quale concordò un'altra computazione [cfr. Aspray 1990a, p. 32]. In tutti e tre i casi comunque si trattava di sistemi IBM la cui velocità era comparabile. La stessa settimana von Neumann incontrò anche Stibitz, il colloquio con il quale fu per von Neumann una rivelazione. Il 10 aprile ne scrisse a Weaver nel seguente modo:

«I spent the better part of a day with Stibitz, who explained to me in detail the principles and the working of his relay counting mechanisms, and showed me the interpolator as well as the almost-finished anti-aircraft fire-control calculator. We had a very extensive discussion of the possibilities of these machines compared with the I.B.M. type, and their adaptability to the problems in which I am interested. Dr. Stibitz even suggested, what went far beyond my expectations, that he may seek permission for an experimental computation of the kind I suggested on the big machine in the process of its breaking in. [...] // At any rate I am staying in contact with Stibitz, and I am extremely glad that you made this possible.»³¹⁹

L'approccio di Stibitz, benché ancora basato su relè elettromeccanici, era molto più evoluto. Nella sua macchina ora, per esempio, erano previsti tre nastri cartacei che contenevano dati ed ordini in codice, in una maniera molto simile a ciò che era previsto nella Rapid Arithmentical Machine del 1940. Stibitz aveva anche introdotto dei sistemi per ridurre gli errori di lettura e scrittura.

Qualche tempo dopo, Metropolis e Nelson vennero a sapere da John Johnston che l'IBM stava sviluppando una moltiplicatrice più complessa, in grado di effettuare diversamente dalla

³¹⁷ Cfr. Metropolis e Nelson (1982, p. 351) ed Aspray (1990, p. 31).

³¹⁸ Leggiamo sul sito di Los Alamos: «The first implosion calculation showed that the fissile material would be strongly compressed and that a high yield would result from assembling a relatively small amount of fissile material if a spherically symmetrical implosion was produced. Although much work on explosives lenses, detonators and other components of the device was required to accomplish this, the Trinity test July 16, 1945, showed that the calculation was correct. About a dozen other calculations of implosion were done to refine it before the end of the war.» [50th Anniversary]

³¹⁹ Lettera di von Neumann a Weaver, 10 Aprile 1944 (VNLC), cito da Aspray (1990a) p. 32.

IBM 601, un triplo prodotto e di dividere.³²⁰ Ai primi di giugno, Nelson si recò a New York per parlare della nuova macchina con il vice presidente dell'IBM John C. Mc Pherson. Esse furono consegnate alla fine del 1944 [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 351].

Risale al 1° agosto 1944 un importante e dettagliato rapporto «on the calculating machines»,³²¹ con cui von Neumann aggiorna Robert Oppenheimer sulla sua attività di monitoraggio delle risorse di calcolo in giro per il paese. Riferiva di essere stato a New York, probabilmente presso la sede dei BTL, dove aveva incontrato gli autori del Bell Telephone Relay-Computer, cioè il matematico G. R. Stibitz e l'ingegnere S. B. Williams; inoltre di essersi recato ad Aberdeen, dove aveva discusso con L. E. Cunningham, capo della sezione per il calcolo automatico del BRL, circa un tipo di moltiplicatrici IBM migliorate, forse le stesse di cui aveva parlato Johnston a Los Alamos, e che erano state promesse a breve al BRL. Von Neumann informava Oppenheimer anche di aver sentito da R. H. Kent, dal maggiore Bennett e dal capitano Goldstein [*sic*] della possibilità che l'Esercito acquistasse un Bell Telephone Relay-Computer per conto del BRL, che però non sarebbe stato pronto prima di 8 mesi.

Von Neumann descriveva in maniera piuttosto entusiasta la macchina di Stibitz: sarebbe valsa la pena di acquistarla per il progetto di Los Alamos, se il tempo previsto per la sua conclusione fosse stato di un anno e mezzo o più, in ogni caso a suo parere non sarebbe stato né necessario né opportuno interessarne l'NDRC, dato che l'Ordnance Department aveva già avviato la procedura di acquisto.³²²

Seguiva un dettagliato elenco delle caratteristiche della macchina IBM e di quella dei BTL, ricavate da un questionario di 21 domande preparato da von Neumann e Frankel. Il computer dei BTL dovrebbe coincidere con il Model V che fu effettivamente poi consegnato al BRL, anzi il documento rappresenta una delle migliori descrizioni delle macchine a relè dei BTL. La macchina in oggetto poteva consistere in un assemblaggio di diversi computer, da 2, 6 o 10, secondo la filosofia “parallelistica” sempre difesa da Stibitz (sappiamo che infine la macchina consegnata al BRL sarebbe poi stata da 6). Ogni computer singolo disponeva di 15 “registri”, che lavoravano come memorie interne ciascuna per memorizzare un singolo numero, più un dispositivo per ciascuna operazione aritmetica, compresa l'estrazione di radice quadrata e, su richiesta, sarebbe stato anche possibile avere quella cubica. Aveva una configurazione a 3 nastri perforati di carta a 6 piste, con 3 fori per pista, che convogliavano dati e istruzioni in codice alle macchine attraverso telescriventi. Utilizzava l'aritmetica a virgola mobile che, sembrò un sogno agli addetti al sistema IBM di Los Alamos, sempre alle prese con problemi di “overflow” e di precisione dei risultati [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 356]. Il codice permetteva di codificare cifre decimali su cinque bit, mediante tre “1”, cosicché un errore avrebbe prodotto o due o quattro “1” [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 354]. L'affidabilità dei componenti, la capacità di autodiagnostica e addirittura di risolvere da sola molti malfunzionamenti, il fatto infine che potesse lavorare per giorni senza interrompere le operazioni e di notte senza operatori, rendevano questa macchina molto veloce, «5 times or more faster than any I.B.M. aggregate», secondo Cunningham.³²³ In ogni caso si attendeva con

³²⁰ Le IBM 601 erano solo moltiplicatrici e costringevano ad una farraginosa procedura per la divisione. [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 351].

³²¹ Lettera di von Neumann a Oppenheimer, 1° agosto 1944. Fotoriproduzione reperita in data 21/07/2010 dal sito de LANL <http://www.lanl.gov/history/atomicbomb/computers.shtml>. Si tratta di un rapporto di 7 pagine numerate inizialmente classificato come “Confidential” e scritto “to report on the calculating machines”, sulla base di una conversazione sul Bell Telephone Relay-Computer avvenuta a New York con Stibitz e Williams, ed una avvenuta al BRL di Aberdeen con Cunningham, Kent, Bennett e “Captain Goldstein” [*sic*] vertente su IBM Multipliers e sulla possibilità che venisse acquistata dal BRL un Bell Telephone Relay-Computer.

³²² *Ivi*.

³²³ Lettera di von Neumann a Oppenheimer, 1° agosto 1944, cit.

ansia la consegna della moltiplicatrice IBM migliorata, dotata di un sistema di controllo che le dava più flessibilità rendendola «more “intelligent” than any tabulator».³²⁴

Negli stessi giorni in cui inviava il promemoria a Oppenheimer, avvenne una scoperta fondamentale per la storia del computer e, chissà, forse anche per la riuscita stessa del progetto Manhattan: von Neumann venne a sapere dell'esistenza dell'ENIAC.

Von Neumann alla Moore School

Cronologicamente siamo adesso allo stesso punto in cui eravamo giunti alla fine del precedente capitolo, alla fine del mese di luglio 1944, quando finalmente due degli accumulatori dell'ENIAC avevano cominciato a lavorare.

Sembra che sia stato per mero caso, come testimonia Hermann Goldstine (1973, p. 182), che von Neumann sia venuto a conoscenza dell'esistenza del progetto dell'ENIAC. Ciò sarebbe avvenuto nel corso di una conversazione occasionale alla stazione di Aberdeen, forse proprio mentre entrambi tornavano dalla riunione ai BRL, di cui von Neumann ci parlava nel suo rapporto a Oppenheimer del 1° agosto 1944, dove citava curiosamente il capitano Goldstine ancora come “Goldstein”. Appena saputo della sua esistenza, Von Neumann si precipitò a vedere l'ENIAC. La sua prima visita avvenne il 7 agosto 1944³²⁵ e, a quanto sembra, egli suggerì subito delle proposte di modifica, in linea con le proprie esigenze computazionali, ma anche sulla base di idee estremamente chiare su come un calcolatore digitale elettronico per la soluzione di EDP avrebbe dovuto essere predisposto. Già l'11 agosto Goldstine inviava a Simon un promemoria in cui sottolineava la «paucity of high speed storage devices», in connessione con le unità di controllo, e faceva presente l'opportunità di stipulare un contratto «with the object of building ultimately a new ENIAC of improved design».³²⁶

Nel corso del mese di agosto von Neumann ebbe frequenti conversazioni con Burks, Eckert, Mauchly, Adele Goldstine e Herman Goldstine [cfr. Goldstine 1973, p. 186]. Il 21 agosto 1944 Goldstine scriveva a Gillon:

«Von Neumann is displaying great interest in the ENIAC and is conferring with me weekly on the use of the machine. He is working on the aerodynamical problems of blast [...]».³²⁷

Aggiungeva di vedere necessari due tipi di modifiche. Da un lato, dopo un colloquio con S. B. Williams, cioè l'ingegnere dei BTL che collaborava con Stibitz, riteneva che si potesse sostituire il dispositivo per la riconfigurazione manuale dei problemi dell'ENIAC mediante una serie di sistemi a relè controllati da un nastro da telescrivente. Qui dunque sembra facesse tesoro delle idee di Stibitz. Dall'altro pensava necessario

«providing a more economical electronic device for storing data than the accumulator. Inasmuch as the accumulator is so powerful an instrument, it seems foolish to tie up such tools merely to

³²⁴ *Ivi*.

³²⁵ Aspray riporta di una lettera di autorizzazione ad accedere all'ENIAC per due mesi, dal 7 settembre 1944, per von Neumann e il suo assistente J. W. Alexander. Cfr. lettera di R. A. Line, ufficiale addetto alla sicurezza dell'Ordnance Department, indirizzata alla Moore School, 5 settembre 1944 (HSRC). Tuttavia una lettera di J. G. Brainerd a Paul N. Gillon del 13 Settembre 1944, (HGAP) da cui si evince che von Neumann era stato alla Moore School prima di quella data in quanto questi aveva avuto “extensive discussions [...] with Dr. Von Neumann” circa l'uso dell'ENIAC in problemi scientifici. Arthur Burks in una comunicazione privata ad Aspray del giugno 1989 concorda. Aggiunge che von Neumann era già stato autorizzato da Aberdeen e che aveva visto l'ENIAC. Cfr. [Aspray 1990a], nota 50 pp. 262-263,

³²⁶ Lettera Goldstine a Simon, “Further Research and Development on ENIAC,” 11 agosto 1944. Cito da Goldstine (1973), p. 185.

³²⁷ *Ivi*, p. 199.

hold numbers temporarily. Eckert has some excellent ideas on a very cheap device for this purpose.»³²⁸

Il meccanismo di cui aveva parlato Eckert era la linea di ritardo al mercurio [vedi Appendice II:1], utilizzata come dispositivo per la memorizzazione rapida. Il 29 agosto si tenne un incontro presso il Firing Table Reviewing Board, a cui presero parte A. A. Bennett, L. Cunningham, Dederick, Goldstine, Kent, Sterne appartenenti allo staff del BRL insieme ai suoi consulenti matematici J. McShane, C. B. Morrey e von Neumann. Il Board raccomandò un nuovo contratto con la Moore School e si parlò di un nuovo calcolatore le cui caratteristiche ³²⁹ furono indicate in un *memorandum* inviato da Morrey a Simon il giorno successivo. Esso doveva avere meno valvole dell'ENIAC, per aumentarne affidabilità e la facilità di manutenzione; essere applicabile a «many types of problems not easily adaptable to the present ENIAC.»; essere in grado di stoccare «cheaply and at high speeds large quantities of numerical data»; doveva avere caratteristiche tali «that the setting up on it of a new problem will require very little time.»³³⁰

Si formarono di lì a poco alla Moore School due gruppi, uno che continuò a lavorare alla costruzione dell'ENIAC opportunamente modificato, introducendo perfezionamenti proposti da von Neumann, ed un altro che si concentrò principalmente su una macchina progettata *ex novo*, che sarà di lì a poco battezzata EDVAC (Electronic Discrete Variable Calculator).

Le modifiche proposte per l'ENIAC rispondevano in gran parte alle nuove esigenze di von Neumann, inquadrare in una visione precisa su come doveva essere un calcolatore, visione che egli doveva essersi andato formando sulla base delle difficoltà pratiche incontrate nelle computazioni a e per Los Alamos, di un preciso quadro dei difetti e dei pregi delle macchine esistenti, comprese quelle di Stibitz, ma soprattutto – supponiamo – seguendo la filosofia progettuale suggerita dal *Memorandum sulle EDP* di Wiener e dalle conversazioni avvenute con Wiener nel corso del 1944, su cui ci informa *Cybernetics*, nel lungo brano che abbiamo citato all'inizio del presente capitolo.

Il 2 settembre 1944 Goldstine scriveva a Gillon che «to solve a quite complex partial differential equation of von Neumann's», l'ENIAC avrebbe richiesto 30 minuti dei quali 28 sarebbero serviti

«just in card cutting and 2 minutes for computing. The card cutting is needed simply because the solution of partial differential equations requires the temporary storage of large amounts of data. We hope to build a cheap high-speed device for this purpose.»³³¹

Come si vede tornava, assillante, il tema del dispositivo ampio, rapido e a buon mercato per lo stoccaggio temporaneo della grande quantità di dati provvisori, prodotti in computazioni che implicavano equazioni differenziali alle derivate parziali, che costituiva il cuore delle preoccupazioni del *Memorandum sulle EDP*, e che ormai possiamo immaginare a Los Alamos costituisse il sogno dei fisici che non sapevano più dove mettere le centinaia di migliaia di schede perforate intermedie che le computazioni producevano. Nella stessa lettera, però, Goldstine aggiungeva una novità rispetto al documento di Wiener del 1940. Diceva:

«we propose a centralized programming device in which the program routine is stored in coded form in the same type storage devices suggested above. The other crucial advantage of central

³²⁸ *Ivi.*

³²⁹ Cfr. Aspray (1990a, p. 37) che si basa su “Minutes of the Meeting of the Firing Table Range Board,” 29 agosto 1944 (HSRH).

³³⁰ Bozza di un Memorandum di Goldstine del 30 agosto 1944, cito da Goldstine (1973), p. 186.

³³¹ Lettera di Goldstine a Gillon, 2 settembre 1944, cito da Goldstine (1973), p. 198.

programming is that any routine, however complex, can be carried out whereas in the present ENIAC we are limited.»³³²

Rispetto al *Memorandum sulle EDP* qui si avverte un progresso, cioè l'utilizzazione di alcuni dei dispositivi veloci di stoccaggio per accogliere le istruzioni di controllo, introducendo così all'interno della macchina le istruzioni in codice che il progetto di Bush e quello di Stibitz avevano lasciato sul nastro cartaceo esterno.

C'erano dei problemi che non si potevano comunque risolvere con l'ENIAC e che necessitavano di una nuova macchina, ma Goldstine avvertiva il proprio superiore che lui, von Neumann e Presper Eckert, avevano delle idee precise in tal senso.³³³ Tali idee emergevano già in una lettera del 13 settembre 1944 in cui Brainerd proponeva a Gillon di finanziare una nuova macchina. Scriveva:

«The progress of work on the ENIAC has led to some rather extensive discussions concerning the solution of problems of a type for which the ENIAC was not designed. In particular, these discussions have been carried out with Dr. von Neumann, who is consultant to BRL on hydrodynamical and aerodynamical problems associated with projectile motion. Dr. von Neumann is particularly interested in mathematical analyses which are the logical accompaniment of the experimental work which will be carried out in the supersonic wind tunnels. [...]

It is not feasible to increase the storage capacity of the ENIAC [...] to the extent necessary for handling non-linear partial differential equations on a practical basis. The problem requires an entirely new approach. At the present time we know of two principles which might be used as a basis. One is the possible use of iconoscope tubes, concerning which Dr. von Neumann has talked to Dr. Zworykin of the R.C.A. Research Laboratories, and another of which is the use of storage in a delay line, with which we have some experience. Such a line could store a large number of characters in a relatively small space, and would ... enable a machine of moderate size to be constructed for the solution of partial differential equations which now block progress in certain fields of research at the BRL.»³³⁴

Come si vede, non solo lo scopo principale della macchina era ora quello del *Memorandum sulle EDP*, ma per svolgere le funzioni del grande magazzino dati veloce e riscrivibile, che doveva avere quelle caratteristiche a causa della necessità di immagazzinare temporaneamente un gran numero di dati,³³⁵ si proponeva di utilizzare proprio degli iconoscopi, secondo uno dei suggerimenti tecnici del *Memorandum sulle EDP*.

Nella lettera si stimava che la macchina sarebbe costata almeno 105.600 dollari ed avrebbe richiesto un tempo di costruzione di un anno a partire dal 1° gennaio 1945. Era comunque previsto che i lavori iniziassero su piccola scala entro il 1° ottobre 1944. Di lì a breve fu firmato il contratto sull'EDVAC.³³⁶

Il 31 agosto 1944, Brainerd aveva fatto pervenire a Goldstine un rapporto di Eckert e Mauchly in cui si proponeva di utilizzare la linea di ritardo al mercurio come dispositivo di stoccaggio rapido.³³⁷ In questo dispositivo un segnale elettrico è ciclicamente trasdotto in segnale acustico e viceversa [Per i dettagli tecnici sulla linea di ritardo, vedi in calce *Appendice II.1*]. La sua invenzione fu fieramente rivendicata da Eckert nei dibattiti sulla paternità dell'invenzione dell'EDVAC; Brainerd ha d'altro canto chiarito che il contributo principale di

³³² *Ivi*.

³³³ Cfr. *ivi*.

³³⁴ Lettera di Brainerd a Gillon, 13 settembre 1944 (HGAP). Cito da Goldstine (1973), pp. 186-7, integrando con la citazione in Aspray (1990a p. 37).

³³⁵ Cfr. lettera di Goldstine a Gillon, 2 settembre 1944, citata da Goldstine (1973), pp. 198-9.

³³⁶ Cfr. Goldstine (1973) p. 197 e nota 7. All'inizio l'EDVAC nasce non come un nuovo contratto ma come un supplemento del contratto dell'ENIAC del 27 ottobre 1944: Supplement No. 4 to contract W-670-ORD-4926, 27 ottobre 1944. Tale indicazione è nel "PY Summary Report No 1," 31 marzo 1945. Cfr. Stern (1980), nota 4 alla p. 353.

³³⁷ Cfr. lettera di Brainerd a Goldstine, 31 agosto 1944, citata da Goldstine (1973), p. 185.

Eckert era consistito nel sostituire il mercurio all'acqua che si usava nelle linee di ritardo già esistenti nei dispositivi radar e che tale innovazione era stata apportata da Eckert nel quadro del progetto PL, che la Moore School aveva svolto per conto dell'MIT Rad Lab, concernente un amplificatore per radar. I cibernetici furono sempre meravigliati dal fatto che questo dispositivo somigliasse in maniera sbalorditiva ad alcuni circuiti riverberanti riscontrati nel cervello; e nel modello di reti neurali di McCulloch e Pitts del 1943, era stato previsto - su suggerimento di Pitts - che i circuiti chiusi di neuroni potessero servire da memorie. Sebbene la questione potrebbe ragionevolmente somigliare alla domanda se sia nato prima l'uovo o la gallina, non sarebbe assurdo pensare che l'adozione della linea di ritardo per l'ENIAC sia stata suggerita dalla lettura dell'articolo di McCulloch e Pitts, se non addirittura da una conversazione con lo stesso Pitts. È necessario a questo punto chiarire meglio, nella misura del possibile, i rapporti intervenuti tra von Neumann, Wiener, McCulloch e Pitts nel corso del 1944.

La questione del coinvolgimento di Wiener nei lavori di Los Alamos

Il prepotente emergere a Los Alamos di problemi matematici come le equazioni di Wiener-Hopf e di questioni numeriche che ricalcavano perfettamente i problemi considerati da Wiener nel *Memorandum sulle EDP*, renderebbe ovvio che sia stato coinvolto nei lavori di Los Alamos. Il *Memorandum* doveva essere noto: non era stato tenuto da Wiener in un cassetto, ma inviato a Bush, cioè, al capo supremo della scienza americana in tempo di guerra. Anche l'interesse computazionale di Wiener per le EDP era ben noto ai matematici americani: in un resoconto del 1941 della rivista dell'American Mathematical Society si espongono le attività dei vari capo consulenti del War Preparedness Committee e di Wiener si dice che «is working on the problem of using this machine [the differential analyzer] or similar machines to solve partial differential equations. If accomplished, this would be an important aid for applied mathematics» [Morse e Hart 1941, p. 296]. Oltretutto tra Wiener e von Neumann c'era assiduità, se non vogliamo parlare di amicizia, da oltre un decennio. Inoltre chi meglio di Wiener avrebbe saputo come affrontare un'equazione di Wiener-Hopf?

Dunque, quando a Los Alamos questi problemi divennero di importanza vitale e nel gennaio 1944 von Neumann iniziò a girovagare per il paese alla ricerca dei calcolatori migliori, è estremamente inverosimile che non sia stato contattato anche Wiener.

Eppure Wiener non fu coinvolto nel Progetto Manhattan. O meglio, è piuttosto sicuro che ciò non sia avvenuto in maniera ufficiale ed esplicita. E nell'autobiografia Wiener si rallegra di non averlo fatto. Qui, riferendosi ad un periodo in cui stava ancora lavorando sui predittori, dunque al più tardi alla fine del 1942, egli racconta di essere stato convocato a Washington da Bush, il quale gli aveva prospettato un incontro con Harold Urey, il responsabile della separazione dell'uranio con il metodo della diffusione. Poco dopo Wiener si era recato a New York per parlare con Urey e tutto si sarebbe fermò lì [cfr. Wiener 1956, pp. 293-4]. Ciò non toglie che Wiener possa essere stato coinvolto in maniera indiretta. Si è già detto dell'abitudine che c'era a Los Alamos di far risolvere problemi matematici in forma non classificata all'esterno, oppure del fatto che von Neumann chiese, ad esempio, informazioni sui calcolatori esistenti a Warren Weaver, ma senza addurre il motivo della richiesta; eppure Weaver era il suo capo in quanto collaboratore dell'AMP. In questo modo possiamo immaginare che molte persone possono aver contribuito all'impresa senza essere messi al corrente dei suoi fini ultimi.

Sintomatico è un episodio accaduto a Ulam al suo arrivo all'MIT nel 1957. Ulam, che conosceva bene Wiener da prima della guerra, aveva partecipato alle ricerche per la bomba atomica e nel 1957 continuava a lavorare a Los Alamos, ha raccontato:

«I met him [Wiener] in the corridor and he stopped me to say, “Ulam! I can’t tell you what I am working on now, your are in a position to put a secret stamp on it!” (This presumably because of my position in Los Alamos.)» [Ulam 1976, p. 94]

Ulam si affrettava a negare di essere mai stato in grado di mettere timbri di segretezza su alcunché, ma evidentemente Wiener riteneva che in passato altri potevano aver utilizzato conversazioni con lui e di farne materia classificata. Certamente a von Neumann durante la guerra sarebbe stato possibile farlo. È utile rileggere in questo senso anche un passo dell’autobiografia in cui Wiener afferma:

«Later on, various young people associated with me were put on the Manhattan Project. They talked to me and to everyone else with a rather disconcerting freedom. At any rate, I gathered that it was their job to solve long chains of differential equations and thereby handle the problem of repeated diffusions. The problem of separating uranium isotopes was reduced to a long chain of diffusions of liquids containing uranium, each stage of which did a minute amount of separation of the two isotopes, ultimately leading in the sum to a fairly complete separation. Such repeated diffusions were necessary to separate two-substances as similar in their physical and chemical properties as the uranium isotopes. I then had a suspicion (which I have, though I know nothing of the detail of the work) that the greater part of this computation was an expensive waste of money. It was explained to me that the effects on which one was working were so vanishingly small that without the greatest possible precision in computation they might have been missed altogether.

This however did not look reasonable to me, because it is exactly under these circumstances of the cumulative use of processes which accomplish very little each time that the standard approximation to a system of differential equations by a single partial differential equation works best» [Wiener 1956, p. 294].

Queste frasi sembrano alludere al fatto che Wiener abbia effettivamente discusso di questioni matematiche riguardanti la bomba atomica, ed in particolare di EDP, con qualcuno che contemporaneamente collaborava con lui ed era nel progetto Manhattan. Sappiamo con certezza che tra questi c’erano Walter Pitts e von Neumann, anche se il secondo non poteva essere considerato “giovane”, avendo nel 1945 quarantuno anni, solo dieci meno di Wiener.

Pitts si occupava specificamente della diffusione gassosa. Alternativamente questi “giovani” potrebbero aver parlato con lui in termini strettamente matematici, senza specificare il significato fisico dei problemi, com’era prassi fare quando si trattavano al di fuori del laboratorio i problemi di Los Alamos. L’interpretazione circa la diffusione dell’uranio potrebbe essere solo frutto dell’immaginazione di Wiener: un tentativo di dare un significato fisico a problemi matematici, sulla base di ciò che sapeva della conversazione che aveva avuto con Urey, il responsabile del progetto per la separazione dell’U235 mediante diffusione gassosa.

Tutto ciò che sappiamo sulle attività di Wiener in questo contesto è molto frammentario e si riesce solo a ricostruire uno scenario più o meno congetturale. Il documento migliore è dato a ben vedere ancora una volta dal passo da noi citato già all’inizio del precedente, in cui Wiener ci parla delle frenetiche conversazioni avvenute con Aiken, von Neumann e Goldstine. Mi si permetta perciò di citarlo di nuovo:

«At this time, the construction of computing machines had proved to be more essential for the war effort than the first opinion of Dr. Bush might have indicated, and was progressing at several centers along lines not too different from those which my earlier report had indicated. Harvard, Aberdeen Proving Ground, and the University of Pennsylvania were already constructing machines, and the Institute for Advanced Study at Princeton and the Massachusetts Institute of Technology were soon to enter the same field. In this program there was a gradual progress from the mechanical assembly to the electrical assembly, from the scale of ten to the scale of two, from the mechanical relay to the electrical relay, from humanly directed operation to automatically directed operation; and in short, each new machine more than the last was in conformity with the memorandum I had sent Dr. Bush. *There was a continual going and coming of those interested in*

these fields. We had an opportunity to communicate our ideas to our colleagues, in particular to Dr. Aiken of Harvard, Dr. von Neumann of the Institute for Advanced Study, and Dr. Goldstine of the Eniac and Edvac machines at the University of Pennsylvania. Everywhere we met with a sympathetic hearing, and the vocabulary of the engineers soon became contaminated with the terms of the neurophysiologist and the psychologist.» [Wiener 1948, pp. 14-5. Il corsivo è mio]

In questo passaggio che, come già detto, si riferisce al 1944, Wiener mostra di conoscere i progetti di macchine ultimate o in costruzione a Harvard (il Mark I), alla Moore School (l'ENIAC e l'EDVAC), e presso il BRL dell'Aberdeen Proving Ground. In quest'ultimo, nel 1944, erano operativi, oltre ad un analizzatore differenziale [cfr. Goldstine 1973, p. 96], anche delle moltiplicatrici IBM [cfr. *ivi*, pp. 129-130] e due calcolatori a relè dei BTL [cfr. *ivi* p. 201]. Wiener aveva parlato con alcuni dei progettisti di computer, e sembrerebbe avesse fatto anche visite per vedere alcune macchine; questo è sicuro solo per nel caso dell'Harvard Mark I. Scrive infatti nell'autobiografia che:

«It was at Harvard, under the supervision of Howard Aiken, that I found the first of the newer switching computers dependent on relays. Aiken was developing them under a government grant. [...] I was surprised to find that Aiken was completely committed to the relatively slow mechanical relay as the mechanical computer's first tool and that he did not put any enormous value on the speed which could be derived by the use of electronic relays» [Wiener 1956, p. 266].

Wiener sembra parlare della prima tappa di una serie di visite. Sottolinea, come suo solito, l'aspetto della velocità come elemento caratterizzante dei calcolatori digitali. In seguito Aiken – ammetteva Wiener – aveva superato «this limitation of point of view» ed era divenuto «one of the most active and original inventors and designers of electronic computers» [Wiener 1956, p. 266]. Già il Mark II, infatti, sarà concepito in maniera molto diversa. Inoltre troviamo che verso la fine del 1944 si era stabilita - almeno per un po' - una certa sintonia di vedute tra Wiener e Aiken.

Dopo aver parlato di Aiken, l'autobiografia di Wiener fa seguire una critica verso quegli inventori «who show practical ingenuity in the devising of gadgets», ma sono anche tentati di cristallizzare «the technique of a subject forever at the precise point to which their ingenuity has carried them and then to offer a profound intellectual and moral resistance - a block, in fact, to later work which departs from their principles.» [Wiener 1956, p. 266.]

Questo atteggiamento conservatore è contrapposto da Wiener a quello del matematico che lavora con carta e penna, ed è abituato a veder altri sviluppare ulteriormente il proprio lavoro. Pensa anche che dietro questo conservatorismo si celassero gli interessi commerciali delle compagnie industriali, nonché i condizionamenti imposti dal sistema dei brevetti [cfr. *ivi*, p. 267]. Si tratta di una critica che, a mio parere, calza male su Aiken, che non sembra aver mai ideologizzato la propria scelta per la tecnologia elettromeccanica, sostenendo che tale opzione fu dettata dal fatto che era stata l'IBM la prima compagnia a mostrarsi disponibile per la realizzazione del suo progetto [cfr. Aiken 1973, pp. 57-8 e 60].

La critica di Wiener avrebbe, in effetti, maggiore ragion d'essere se fosse rivolta verso i BTL ed ai membri della Divisione 7, che avevano contrastato in maniera vigorosa lo sviluppo del calcolatore digitale elettronico. L'autobiografia di Wiener, comunque, evita sistematicamente di fare nomi di persone verso cui esistevano motivi di contrasto e polemica.

Sembra, comunque, che Wiener avesse un quadro piuttosto preciso del punto a cui era giunta l'evoluzione dei calcolatori negli Stati Uniti nel 1944, e che comprendesse anche le ragioni di mentalità ed industriali che avevano rallentato lo sviluppo della versione elettronica di esso. Sarebbe anche interessante sapere in quale veste Wiener abbia potuto conoscere aspetti

tecnicisti relativi a calcolatori spesso sottoposti a segreto militare,³³⁸ e in quale veste si siano svolte le consultazioni nel corso del “continual going and coming”, se in maniera completamente informale o se furono in qualche modo formalizzate come consulenze per l’AMP. È noto che l’AMP svolse tra le altre cose «computational services concerned with the Evaluation of Integral; [...]; the development of techniques adapted to the solution of special problems; the nature and capabilities of computing equipment.» [Weaver 1946, pp. VII-VIII.] e che furono stesi diversi rapporti relativi ad una *Survey of Computing Machines*, il cosiddetto “AMP Study 171”.³³⁹

Sappiamo, per esempio, che nell’aprile 1944 Warren Weaver si rivolse a Bigelow per chiedergli consigli su come coinvolgere Wiener riguardo ad un problema che sembrerebbe essere stato piuttosto urgente e che richiedeva la valutazione di ricerche di altri studiosi.³⁴⁰

Sintomatico è anche il fatto che, negli anni immediatamente successivi, Warren Weaver si formò di Wiener l’immagine di un «*expert on computers*»,³⁴¹ la cui collaborazione riteneva irrinunciabile per il progetto di computer digitale dell’MIT finanziato dalla Rockefeller Foundation nell’immediato dopoguerra.

È certo comunque che nel corso del 1944 Wiener aveva ripreso a frequentare Julian Bigelow, la collaborazione con il quale era stata interrotta dal termine della ricerca sui predittori, dopodiché Bigelow era stato inserito nel gruppo di statistica dell’AMP della Columbia University a New York.

Sappiamo che Wiener e Bigelow si recarono a von Neumann a portargli “A Logical Calculus”, uscito del dicembre 1943 [cfr. Aspray 1990b, nota 13, p. 297]. Sappiamo anche che Bigelow in questo periodo si stava occupando di un piccolo sistema di calcolo. Nell’agosto 1944 vi fu anche un incontro a tre a New York tra Bigelow, Wiener e Pitts [cfr. Piccinini 2003, p. 70]. Si era parlato probabilmente di calcolatori dato che il 7 agosto 1944 Bigelow scrisse a Wiener comunicandogli il desiderio che, a guerra finita, il Center of Analysis dell’MIT lo chiamasse a collaborare nella costruzione di un computer che fosse all’altezza del prestigio dell’MIT.³⁴² Il 12 agosto 1944 Wiener invitava Pitts, preannunciandogli: «I have a lot of new stuff to talk with you both scientific and personal».³⁴³ In un’altra lettera del 17 ottobre 1944, Wiener scrive a Pitts di avere intenzione di voler recarsi a New York a fargli visita e gli annuncia: «I have a lot to talk over with you [...] concerning computing machine theory».³⁴⁴ Lo

³³⁸ Goldstine (1973, pp. 215-6) ci informa che prima del 1945 ENIAC e EDVAC erano stati classificati come “confidential” e che nella primavera del 1945 furono riclassificati come “restricted” (dunque al livello inferiore), in seguito ad una richiesta da parte di Weaver di un *Report on Computing Devices* per l’NDRC a von Neumann.

³³⁹ Di questo “AMP Study 171” Weaver parla come di una “Survey of Computing Machines” Weaver (1946, p. VIII). Owens (1996, nota 29, p. 41) riferisce che in NARA, RG 227 (OSRD), [Records of the Applied Mathematics Panel, Box 62, “Study 171-Survey of Computing”] è contenuto il rapporto Eckert (*et al.* 1945). Di [Eckert *et al.* 1945] e della sua collocazione nello studio 171 si discusse nel processo Honeywell vs Sperry Rand cfr. [Verdict 1973]. Hanno il codice 171 anche due studi riportati nel *C.V.* di Stibitz (1986) e cioè Stibitz (1945a e 1945b). Stibitz (1945a) contiene una lista di distribuzione per 137 persone, che contempla tra i destinatari: «John von Neumann, Norbert Wiener, Edmund C. Berkeley, Howard Aiken, Warren Weaver, Herman Goldstine and J. G. Brainerd» [Hook *et al.*, p. 457].

³⁴⁰ Lettera di Bigelow a Weaver, 22 aprile 1944 (NARA), AMP, citata da Owens (1988, p. 295).

³⁴¹ La lettera è citata da Weaver (1949), il corsivo è mio.

³⁴² Lettera di Bigelow a Wiener, 7 agosto 1944 (WAMIT), Box 4, 66. Citato da Piccinini (2003, p. 70). Piccinini (2003, p. 40) parlando sempre di questa lettera riporta una frase di Bigelow relativa ad una animata discussione del 1942 di Wiener e Bigelow con Aiken sulle scale di Harvard.

³⁴³ Lettera di Wiener a Pitts, 12 agosto 1944 (WAMIT), Box 4, ff 66. Cito da Piccinini (2003, p. 69).

³⁴⁴ Lettera di Wiener a Pitts, 17 ottobre 1944 (WAMIT), Box 4, ff 66. Cito da Piccinini (2003, p. 77). Il corsivo è mio.

stesso giorno Wiener scrive a von Neumann chiedendogli di poterlo vedere in occasione di questo incontro con Pitts [cfr. Piccinini 2003, p. 77].³⁴⁵

Questi incontri potrebbero rientrare nella fase del “continual going and coming”. Ed è certo, come peraltro ci dice abbastanza esplicitamente *Cybernetics*, che durante questo “going and coming” Wiener abbia interagito intensamente con von Neumann, comunicandogli le proprie idee sul calcolo e consigliandolo circa le linee generali da seguire per modificare l’ENIAC, perché potesse essere adattato alla soluzione di EDP.

Occorre anche notare che in *Cybernetics*, Wiener non dà un semplice riassunto del contenuto del *Memorandum sulle EDP*, ma un elenco di requisiti, che è leggermente, ma significativamente, diverso rispetto al progetto del 1940. In particolare Wiener consiglia:

- «1. That the central adding and multiplying apparatus of the computing machine should be numerical, as in an ordinary adding machine, rather than on a basis of measurement, as in the Bush differential analyzer.
2. That these mechanisms, which are essentially switching devices, should depend on electronic tubes rather than on gears or mechanical relays, in order to secure quicker action.
3. That, in accordance with the policy adopted in some existing apparatus of the Bell Telephone Laboratories, it would probably be more economical in apparatus to adopt the scale of two for addition and multiplication, rather than the scale of ten.
4. That the entire sequence of operations be laid out on the machine itself so that there should be no human intervention from the time the data were entered until the final results should be taken off, and that all logical decisions necessary for this should be built into the machine itself.
5. That the machine contain an apparatus for the storage of data which should record them quickly, hold them firmly until erasure, read them quickly, erase them quickly, and then be immediately available for the storage of new material» [Wiener 1948 p. 4].

Ad un esame approfondito nell’elenco riportato troviamo qualcosa in più rispetto al *Memorandum sulle EDP*. Innanzitutto si tratta di regole generali, cosa di per sé diversa dalle caratteristiche implicite escogitate *ad hoc* per la soluzione di un problema specifico come la soluzione delle EDP. In questo senso, la “macchina di Wiener” del 1940 potrebbe essere considerata come un’applicazione di questi principi generali. Si nota un’unica differenza, quando si dice che tutte le decisioni logiche vanno affidate alla macchina: di decisioni logiche il *Memorandum sulle EDP* non faceva parola, o quantomeno le conteneva in maniera estremamente implicita, laddove si indicava la necessità di un sistema di commutatori per preservare l’area dei dati iniziali e al contorno registrati nella prima parte del nastro. Quest’ultimo aspetto è certamente più recente e potrebbe dipendere in parte dall’interazione tra Wiener e Walter Pitts, in parte dall’interazione con lo stesso von Neumann.

In ogni caso non è difficile vedere che sono quelle elencate in *Cybernetics* sono precisamente le linee adottate da von Neumann dall’agosto 1944 in poi nel modifiche all’ENIAC e nel proporre il nuovo progetto dell’EDVAC.

Comunque il processo contraddistinto dalle consultazioni frenetiche del “going and coming”, dal convegno di Princeton del 6 e 7 gennaio 1945 che fece loro seguito ed dai lavori dei mesi immediatamente successivi, non fu solo una fase di recezione passiva da parte di von Neumann delle idee di Wiener del 1940, ma un periodo di grande creatività che condusse alla creazione del computer ad architettura von Neumann ed al prendere forma della Cibernetica in tutta la sua globalità. Vedremo nei due capitoli successivi come ciò sia avvenuto.

³⁴⁵ Il 19 ottobre Wiener racconta a Rosenblueth dell’incontro avvenuto a New York e la Lettera di Wiener a Rosenblueth, 19 ottobre 1944 (WAMIT), Box 4, ff. 66. Citata da Piccinini (2003, p. 77).

Capitolo 7 – Neurofisiologia e Computer

Prima di passare a discutere nel prossimo capitolo del Convegno di Princeton e del periodo che segue immediatamente ad esso, nel presente capitolo dobbiamo seguire un altro insieme di fili che conducono alla creazione del computer ed alla Cibernetica: quelli relativi alle ricerche neurologiche. In effetti la teoria dei calcolatori, si può dire, diviene una scienza – o almeno ha cercato di divenire tale – proprio attraverso la neurologia, ed ancora una volta questo difficile passaggio è stato favorito dalla Cibernetica.

La teoria neuronale

Innanzitutto è utile accennare allo stato dell'arte delle conoscenze sul cervello sul finire degli anni Trenta. Risalgono alla fine dell'Ottocento due teorie rivali sulla natura del sistema nervoso: la teoria reticolare e la teoria neuronale. Entrambe basate su osservazioni al microscopio ottico, la prima vedeva il sistema nervoso come una rete complessa di fili privi di interruzioni, la seconda introdotta nel 1889 da Santiago Ramon y Cajal (1852-1934), si incentrava sulla tesi che il sistema nervoso fosse costituito da cellule costituenti unità strutturalmente indipendenti. Il termine “neurone” per indicare la cellula nervosa fu introdotto poco dopo dal tedesco Heinrich von Waldeyer-Hartz (1836-1921). Le interruzioni tra un neurone e l'altro vennero chiamate “sinapsi” nello stesso arco di anni da Charles Sherrington (1847-1952) [cfr. Fantini 2000a].

La scoperta della natura elettrica dell'impulso nervoso è precedente. Fu asserita con chiarezza già da Du Bois-Reymond verso la metà dell'Ottocento. Negli anni Venti del Novecento, con l'introduzione degli amplificatori elettronici e di altri dispositivi elettronici, come gli oscilloscopi, divenne possibile poi studiare piccole differenze di potenziale. Questo rese possibile comprendere meglio la conduzione nervosa e portò a formulare la legge del tutto o niente, che si deve ad Edgar Douglas Adrian (1889-1977). In particolare si comprese che lo stimolo nervoso che giunge ad un neurone produce una scarica nervosa solo se oltrepassa una soglia di determinata intensità; che l'impulso prodotto dallo stimolo, detto “potenziale d'azione”, corrisponde al rapido cambiamento di differenza di potenziale tra interno ed esterno della membrana del neurone; e che né l'intensità né la velocità di propagazione del potenziale d'azione dipendono dallo stimolo, ma dalla natura del nervo. Nel 1929 viene scoperto l'elettroencefalogramma. Solo dopo la Seconda guerra mondiale si chiariranno del tutto i meccanismi della conduzione nervosa, in particolare il funzionamento della cosiddetta “pompa sodio-potassio”, descritta da Alan Lloyd Hodgkin e Andrew Huxley. Grazie soprattutto al contributo di Bernard Katz, si comprenderà anche il ruolo chiave svolto dalla chimica dei neurotrasmettitori, e si svilupperanno delle teorie del codice di lettura dei messaggi nervosi [cfr. Fantini 2000b].

Il cervello elettronico di Rudolf Ortway

Indipendentemente dalla validità dell'ipotesi neuronale o di quella reticolare, restava comunque chiaro che l'impulso nervoso era di natura elettrica. Sul finire dell'Ottocento, come abbiamo visto, si era sviluppato il telefono e il telegrafo, e con grande tempismo erano stati anche progettati centralini automatici, pur con scarsa diffusione. In questo contesto l'idea che il cervello potesse essere concepito come un centralino telefonico ebbe una fortuna piuttosto precoce, attestata dal libro *The Grammar of Science* di Karl Pearson (1892), che ne parla in un

paragrafo dal titolo “The Brain as a Central Telephone Exchange” [pp. 53-5]. Quattro anni dopo essa è ripresa in *Matière et mémoire* da Henri Bergson (1896), dove leggiamo:

«Le cerveau ne doit donc pas être autre chose, à notre avis, qu’une espèce de bureau téléphonique central: son rôle est de “donner la communication”, ou de la faire attendre» [p. 17]³⁴⁶.

Abbiamo anche già visto che negli anni Trenta ormai l’algebra dei relè, oggi nota soprattutto per l’opera di Claude Shannon, era divenuta un tema di punta della ricerca tecnologica a livello mondiale. Alle soglie del 1940 l’applicazione dei relè telefonici elettromeccanici aveva dato luogo ad un filone di calcolatori digitali sviluppato da Stibitz negli USA e da Zuse in Germania. Appariva chiaro ad alcuni, come nel caso di Bush, che non si trattava altro che dell’estensione delle tecnologie dei centralini automatici ai problemi del calcolo. Negli stessi anni era sorta anche la possibilità di costruire sistemi di calcolo digitali che sfruttassero le proprietà di funzionamento discreto dei tubi elettronici. Mettendo insieme le idee di Pearson e di Bergson con la teoria neuronale e queste ultime innovazioni si sarebbe potuto agevolmente giungere a congetturare che il cervello opera come un calcolatore a relè.

Quest’ultima nozione formò la base su cui lavorerà gran parte della prima Cibernetica. Prima di discutere come essa si formò negli Stati Uniti, vorrei discutere il caso piuttosto sorprendente di un corrispondente ungherese di von Neumann, il direttore dell’Istituto di Fisica Teorica dell’Università di Budapest, Rudolf Ortway (1885-1945), che dimostrerebbe come queste stesse idee fosse scaturite indipendentemente anche nella Mitteleuropa.

Nel 1987 sono stati pubblicati ampi stralci di un fitto carteggio intervenuto tra von Neumann e Ortway, custodito a Budapest. Il 25 dicembre 1939 Ortway ripropone all’attenzione di von Neumann una questione - sulla quale aveva già più volte richiamato l’interesse dell’interlocutore - riguardante «the theory of operation of the brain», che Ortway riteneva «ripe for a solution». Purtroppo, Ortway lamenta del fatto che i medici del tempo «almost entirely lack the capability which would allow them to see the simple and theoretical structure of a complicated complex». Al contrario «physicists and mathematicians are better trained to achieve this. I think only an outsider could give an impetus in this regard, of course in co-operation with physicians and physiologists!».³⁴⁷ Ortway ritiene che tra i neuroni sensoriali e quelli motori esista una rete che è «a highly sophisticated switchboard system, the scheme of which we do not know». Esiste il problema, egli ne conclude, «to propose theorems about this or to devise an adequate model for certain substantial features». Egli propone inoltre un’analogia con un contatore elettronico dei due fisici ungheresi Forró e Barnóthy.³⁴⁸

Il 30 marzo 1940 Ortway aggiunge di non ritenere che il cervello sia «very similar to computing equipment consisting of electronic valves, but I do believe that the brain is a complicated and very specialized piece of equipment which may be very simple in terms of basic principles!».³⁴⁹ Egli insiste, come aveva fatto nella precedente lettera, nell’indicare la necessità di trovare un’unità elementare del cervello come l’atomo o il gene, inseguendo una impostazione che si definirebbe riduzionistica. Inoltre nota che sarebbe da considerare un approccio troppo limitato se per in questo caso per “mechanism” si intendesse «a machine consisting of rigid parts».³⁵⁰

³⁴⁶ Riprendo da Jérôme Segal (2003, pp. 162-3) le indicazioni circa Pearson e Bergson. Segal a sua volta ringrazia per le indicazioni sulla storia delle metafore del cervello F. Tomasi.

³⁴⁷ Lettera di Ortway a von Neumann, Budapest, 25 dicembre 1939, cito da Nagy *et al.* (1989, pp. 185-186).

³⁴⁸ Il riferimento va certamente a Madeleine Forró (1904-1993) e Jenő Barnóthy (1904-1996), fisici esperti di raggi cosmici e di magnetismo, coniugi dal 1938. Fino al 1948, anno in cui emigrarono negli Stati Uniti, essi erano stati attivi presso l’Università di Budapest, costruendo dei grandi contatori per la rilevazione della radioattività [cfr. Fenyves e Somogyi 1997].

³⁴⁹ Lettera di Ortway a von Neumann, 30 marzo 1940, cito da Nagy *et al.* (1989, pp., p. 186).

³⁵⁰ *Ivi.*

Il 29 gennaio 1941 egli ripete che solo «an outsider, not a physician, can perform this task - or at least provide the decisive impulse. [...] The big trouble is that the physicians who know the facts are so hostile towards a more abstract way of thinking».³⁵¹ Egli è convinto inoltre che sarebbe necessaria una modellizzazione con metodi assiomatici simile a quella applicata da von Neumann alla teoria dei giochi. Il 29 gennaio 1941 lo invita, perciò, ad applicare gli stessi metodi al problema dei circuiti di commutazione. Gli dà degli spunti che precorrono in maniera sorprendente le idee che si ritroveranno in Wiener anni dopo. Ortway scrive infatti:

«The problem seems to be this: the brain can be conceived as a network with brain cells in its nodes. These are connected in a way that every individual cell can receive impulses from more than one other cell and can transmit impulses to several cells. Which of these impulses are received from or passed on to other cells may depend on the state of the cell, which in turn depends on the effects of anything that previously affected this particular cell. It may perhaps be sufficient that a cell has a limited number of potential states. (Although genetics shows us how differentiated a cell can be, since we know that there are hundreds of genes within a chromosome.) The actual state of the cells (which I conceive as being numbered) would characterize the state of the brain. There would be a certain distribution corresponding to every spiritual state and that state would be relevant to every reaction, e.g. the way in which a stimulus is transmitted from a nerve. This model may resemble an automatic telephone switchboard; there is, however, a change in the connections after every communication. Perhaps the ever-refining technologies in the switchboard equipment would provide a facile analogy.»³⁵²

Qui non soltanto si hanno indicazioni che sembrano precorrere l'articolo di McCulloch e Pitts su "A logical calculus", ma si ha anche l'ulteriore visione di Wiener, che interpreta le reti neuronali proposte da McCulloch e Pitts come un vero e proprio progetto per un cervello elettronico, nella misura in cui si sostituiscano dispositivi a commutazione al posto dei neuroni [cfr. Wiener 1948, p. 14]. Nella lettera del 16 febbraio 1941, che è l'ultima di cui si disponga, Ortway chiude in una maniera davvero sorprendente:

«these days everybody is talking about organization and totality. Today's computing machines, automatic telephone switchboards, high-voltage equipment such as the cascade transformer, radio transmitter and receiver equipment, and also industrial plants or offices are technical examples of such organizations. I think there is a common element in all of these organizations which can be the basis for an axiom. I don't know if there have been any attempts in this direction. This interests me for the following reason. I believe that once it is possible to identify clearly the essential elements of an organization such as these, this would give us a survey of possible forms of organization. This, then, would facilitate our understanding of such systems as the brain.»³⁵³

Questo discorso assume una grande importanza per la comprensione della natura della Cibernetica. Infatti qui veniamo introdotti da Ortway ad una terza interpretazione della Cibernetica, accanto a quella "in grande", la teoria delle comunicazioni generalizzata, e quella "in piccolo", la neuro-Cibernetica. Si tratta di una Cibernetica generalissima intesa come teoria dell'organizzazione dalla quale in fin dei conti entrambe le altre due interpretazioni potrebbero discendere. È interessante notare come anche questa terza accezione si ritrovi in Wiener, sebbene mai espressa con la lucidità della lettera appena citata. Scrive, infatti, Wiener nell'autobiografia: «many years before, Vannesar Bush had suggested to me that new scientific tools should be found to deal with new theories covering control and organization» [Wiener 1956, p. 322].

Devo confessare che la figura di Ortway che emerge dalle lettere citate resta per chi scrive profondamente enigmatica. Pur tenendo conto della diffusione mondiale delle idee riguardanti il cervello come centralino automatico, l'algebra dei relè, la sua applicazione ai calcolatori e

³⁵¹ Lettera di Ortway a von Neumann, 29 gennaio 1941. Cito da Nagy *et al.* (1989), p. 187.

³⁵² *Ivi.*

³⁵³ Lettera di Ortway a von Neumann, 16 febbraio 1941, cito da da Nagy *et al.* (1989), p. 187.

dei contatori elettronici per gli usi nucleari, resta l'interrogativo su come questo fisico ungherese potesse conoscere in maniera così precisa e ampia - e in tempo di guerra - gli sviluppi tecnologici e le riflessioni biologiche del suo tempo. L'autore delle lettere ci informa il 25 dicembre 1939 di essere stato studente di medicina [cfr. Nagy *et al.* p. 187] ed ha un'ottima formazione filosofica.³⁵⁴ Tutti questi tratti si incastrerebbero quasi alla perfezione tra loro se stessimo parlando di Wiener, visto che oltre ad essere un matematico e ad avere una conoscenza senza pari delle tecnologie del tempo, aveva studiato in gioventù filosofia e biologia con un interesse particolare proprio per la genetica, come ci dice Ortway, nella citata lettera. Proprio nel 1940 Wiener aveva proposto la costruzione di un calcolatore elettronico e conosceva con molta probabilità il progetto dell'MIT Rapid Arithmetical Machine. Chi scrive non ha potuto vedere le lettere nell'originale³⁵⁵ e non può che invitare futuri studiosi a chiarire meglio la questione ed a spiegare biograficamente come sia stato possibile che Rudolf Ortway potesse ragionare in termini così wieneriani. In ogni caso, su un fatto il carteggio ci conforta senza titubanze, e cioè che von Neumann tra il 1939 e il 1941 era perfettamente a conoscenza delle idee relative al cervello come calcolatore dotato di "relè" elettronici.

Warren McCulloch

Le idee espresse da Ortway formano, singolarmente, il tema di conversazioni che ebbero luogo nella prima metà del 1941 tra lo psichiatra Warren McCulloch e Norbert Wiener. Ha ricordato McCulloch:

«I first laid eyes on him [Wiener] at dinner with Rosenblueth when they, with Bigelow, were mechanizing teleology. *He told me promptly what I could expect of my own theories of the working of the brain. Time proved him right*» [McCulloch 1965, p. 16. Il corsivo è mio].

L'incontro avvenne quasi sicuramente nella primavera del 1941³⁵⁶ per il tramite di Rosenblueth, che McCulloch conosceva almeno dal 1938.³⁵⁷ McCulloch restò sorpreso dalla precisione e dalla chiarezza delle idee neurofisiologiche di Wiener, il quale gli parlò

«of various kinds of computation and was happy with my [di McCulloch] notion of brains as, to a first guess, digital computers, with the possibility that it was the temporal succession of impulses that might constitute the signal proper» [McCulloch 1974]

Ma vediamo come queste idee si erano andate formando dal punto di vista di McCulloch. Questi è un altro dei principali protagonisti della Cibernetica. Originario del New Jersey,

³⁵⁴ Il carteggio tra von Neumann e Ortway è in parte custodito presso la Library of Congress di Washington e in parte a National Technical Information Center and Library (OMIKK), Budapest. È stato pubblicato nel libro D. Nagy, F. Nagy e P. Horvát (1987) e gli articoli relativi al cervello elettronico sono in D. Nagy, P. Horvát e F. Nagy (1989). Tuttavia nessuna lettera tra quelle custodite nel carteggio che si trova a Washington, che mi sono state gentilmente inviate in fotocopia dal curatore della Library of Congress, hanno attinenza con l'argomento del cervello elettronico. Tutte le lettere di Ortway che riguardano questo aspetto sono custodite a Budapest e sono state da me citate dall'articolo di D. Nagy *et al.* (1989), così come essi stessi le hanno tradotte in inglese dall'ungherese.

³⁵⁵ Anche Aspray (1990, nota 20, p. 313) nel trattare del carteggio tra von Neumann e Ortway asserisce di non aver visto le lettere nell'originale, di non sapere l'ungherese, e mostra un qualche sbigottimento sulla somiglianza sorprendente col programma cibernetico di Wiener.

³⁵⁶ Si può ritenere piuttosto sicura la datazione alla primavera 1941. Infatti McCulloch dice di non ricordare se l'incontro avvenne nella primavera del 1940 o in quello del 1941. Ricorda però sicuramente che avvenne prima di Pearl Harbour (dicembre 1941). Sappiamo tuttavia che nella primavera 1940, Wiener non aveva ancora iniziato a lavorare sui "filtri predittivi", teoria che dal racconto di McCulloch sembra invece essere in una fase piuttosto avanzata. Taglia la testa al toro, l'ulteriore ricordo di McCulloch che Wiener già stava lavorando con Bigelow, assegnato al progetto nel gennaio 1941 [cfr. McCulloch 1974].

³⁵⁷ Lo dimostrano le lettere di McCulloch a J. F. Tönnies, 11 Aprile 1938 (in MCAPS) ff. Tönnies e di McCulloch a Rosenblueth, 22 dicembre 1939, (in MCAPS, ff. Rosenblueth), citate da Piccini (2003, p. 27 e nota 38).

Warren S. McCulloch (1898–1969) non era un matematico ma uno psichiatra con forti interessi neurofisiologici e una formazione filosofica e psicologica [cfr. McCulloch 1960, pp. 1-2]. Già nei suoi studi per il Bachelor aveva maturato un forte interesse per la teoria della conoscenza applicata alla matematica. Consegui il master in psicologia nel 1923 alla Columbia University, occupandosi di estetica sperimentale; infine divenne medico nel 1927 presso il College of Physicians and Surgeons di New York, dove aveva maturato uno spiccato interesse per la fisiologia del sistema nervoso. Iniziò la carriera di psichiatra nel 1928 al Bellevue Hospital, poi nel 1930 passò al Rockland State Hospital for Insane, dove incontrò Eilhard von Domarus, uno psichiatra-filosofo, che utilizzava la logica per studiare la schizofrenia, mettendo insieme studi clinici ed i risultati di Russell, Heidegger, Whitehead e Filmer S. C. Northrop. Sotto la supervisione di Northrop, che sarà invitato alle Macy Conferences, von Domarus aveva scritto una tesi su “La struttura logica della mente: una inchiesta sui fondamenti filosofici della Psicologia e Psichiatria” [cfr. McCulloch 1960, p. 2]. Nel 1934 McCulloch si trasferì presso il laboratorio di Neurofisiologia dell’Università di Yale, dove prese ad occuparsi di epistemologia sperimentale sotto il fisiologo J. G. Dusser de Barenne [cfr. Obituary: J. G. Dusser de Barenne].

Un punto fermo della ricerca di McCulloch è l’interesse per la logica. Nel 1923 aveva tentato di costruire una logica dei verbi transitivi. Poi introdusse la nozione di “psychon” (psicone), termine con cui intendeva l’evento unitario irriducibile, causato dagli psiconi precedenti e, a sua volta, causa di psiconi successivi [cfr. McCulloch 1960, p. 8]. Nel corso degli anni Trenta, McCulloch iniziò a cercare di formulare una teoria che utilizzasse il calcolo proposizionale ed a considerare lo psicone come il corrispettivo delle proposizioni atomiche del calcolo proposizionale [cfr. McCulloch 1974]. In questo periodo un ruolo particolarmente importante ebbe l’incontro con Joseph H. Woodger (1894–1981) in visita a Yale,³⁵⁸ autore del libro *The Axiomatic Method in Biology* (1937), che ispirandosi ai *Principia Mathematica* di Russell e Whitehead ed al Neopositivismo, tentava una assiomatizzazione della genetica, dell’embriologia e della tassonomia [cfr. *Joseph Henry Woodger*].

Un influsso non trascurabile nella gestazione delle idee di McCulloch su “A Logical Calculus” devono avere avuto anche alcuni incontri con Wiener avvenuti nella primavera del 1941 di cui si è detto. Nella seconda metà del 1941 seguì un carteggio tra McCulloch e Rosenblueth,³⁵⁹ in cui quest’ultimo, della cui “acribia” sperimentale ereditata da Cannon abbiamo detto, diceva di ritenere proficuo assumere un approccio più teorico e ipotetico verso la neurofisiologia, secondo le idee di Wiener, approccio che lo stesso McCulloch d’altro canto cercava di perseguire da tempo.

Come si vede, era come se le esigenze comunicate da Ortway a von Neumann fino a qualche mese prima, fossero ora state recepite da due medici come McCulloch e Rosenblueth, attraverso Wiener. Perché il sogno di Ortway fosse completamente esaudito mancava soltanto che queste idee fossero poste in forma rigorosa e ciò avvenne con il sostegno che McCulloch trovò in un logico e matematico eccezionalmente dotato come il giovanissimo Walter Pitts.

Walter Pitts e la scuola di Rashevsky

Walter Pitts (1923–1969) è stato indiscutibilmente uno dei principali protagonisti della Cibernetica. Nato a Detroit, era un giovane brillantissimo, versato specialmente in logica e matematica, ma con una vastissima cultura che era andato costruendosi in maniera

³⁵⁸ Cfr. Lettera di McCulloch a Ralph Lillie, ca. febbraio 1943 (MCAPS), ff. Lillie, citata da Piccinini (2003, pp. 28-9).

³⁵⁹ Lettere di Rosenblueth a McCulloch, 21 giugno, 5 settembre e 3 dicembre 1941; di McCulloch a Rosenblueth, 1 maggio 1941 (MCAPS, ff. Rosenblueth, citate da Piccini (2003).

autodidattica. La sua giovinezza ci è stata raccontata soprattutto dal suo carissimo amico Jerome Y. Lettvin (nato nel 1920), destinato anch'egli ad avere un ruolo nella prima Cibernetica, che ha raccontato di lui aneddoti che sono sostanzialmente rappresentativi del personaggio. Pitts per difficoltà familiari era divenuto praticamente un *homeless*. A dodici anni aveva scoperto i *Principia Mathematica* di Russell e Whitehead in una biblioteca e, dopo tre giorni di studio intenso, aveva inviato una lettera a Russell in cui evidenziava delle lacune individuate nel primo volume. Russell gli rispose con una lettera di vivo apprezzamento, invitandolo a studiare in Gran Bretagna. Pitts restò negli Stati Uniti; iniziò, però, a frequentare l'Università di Chicago, senza regolare iscrizione. Nel 1938, a quindici anni, lesse l'ultimo libro di Rudolf Carnap, probabilmente *The logical syntax of language* [Carnap 1937],³⁶⁰ annotandovi quelli che considerava essere degli errori e consegnò il volume all'autore, senza presentarsi. Carnap avendo riconosciuto il talento del ragazzo impiegò due mesi per ritrovarlo, finché non gli procurò un umile impiego presso l'Università.³⁶¹

Tra il 1938 e il 1942, Pitts fu studente di Carnap e cominciò a lavorare all'interno della scuola di biofisica di Rashevsky, pubblicando articoli molto significativi. Nicolas Rashevsky (1899–1972), era un fisico di origine russa che era giunto nel 1934 all'Università di Chicago, dove lavorò presso i dipartimenti di psicologia e fisiologia. In quest'ultimo, nel 1940, fondò una "Section of Mathematical Biophysics", ribattezzata nel dopoguerra Committee on Mathematical Biology;³⁶² nel 1939 Rashevsky aveva anche fondato il *Bulletin of Mathematical Biophysics*. L'idea centrale della biofisica di Rashevsky consisteva nel creare una biologia matematica che stesse in rapporto alla biologia sperimentale, come la fisica matematica stava alla fisica sperimentale [cfr. Cull 2007, p. 179]. Le sue principali fonti di ispirazione erano le ricerche di Alfred J. Lotka (1880–1949) e quelle di Vito Volterra (1860–1940).³⁶³ La gamma di fenomeni biologici a cui Rashevsky si interessa è la più varia. Tra di essi vi è anche la modellizzazione matematica del singolo neurone, per la quale utilizza le nozioni di diffusione delle sostanze e i gradienti elettrochimici. Nel 1933 propose un modello costituito da un sistema di due equazioni differenziali lineari ed una non lineare, per rappresentare la variazione di concentrazione di due fattori - che poi si scopriranno essere sodio e potassio - e dar conto dei fenomeni eccitatori ed inibitori nella trasmissione neuronale e del comportamento tutto o niente [cfr. Rashevsky 1933]. Un ulteriore raffinamento si può vedere in Rashevsky (1936). Le sue ricerche confluiscono nel volume *Mathematical Biophysics* (1938), che sarà seguito nel dopoguerra da diversi aggiornamenti.

Rashevsky riconobbe subito la feconda genialità di Walter Pitts, il quale iniziò a condurre ricerche sotto la guida di Alston S. Householder sulla teoria dei neuroni secondo l'approccio biofisico di Rashevsky [cfr. Pitts 1942a; 1942b; 1943a].³⁶⁴ Householder e Landahl (1945) pubblicheranno alla fine della guerra un manuale su *Mathematical Biophysics of the Central Nervous System*, nel quale un posto d'onore ha la ricerca condotta nel 1943 da Pitts con McCulloch su "A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity".

³⁶⁰ Il libro viene citato anche in McCulloch e Pitts (1943).

³⁶¹ Intervista a Jerome Y. Lettvin, 2 giugno 1994, con materiale aggiunto nel 1997, in Anderson e Rosenfeld (2000), pp. 2-3.

³⁶² Sulla scuola di biofisica di Rashevsky, vedi Rapoport e Landau (1951), Abraham (2000, 2002, 2004), Cull (2007).

³⁶³ Lotka (1925), Volterra (1926a, 1926b, 1931).

³⁶⁴ Alston Scott Householder (1904–1993), studia filosofia e matematica. Ottiene il *Ph.D.* all'Università di Chicago nel 1937, con una tesi sul calcolo delle variazioni. A Chicago entra nella cerchia di Nicolas Rashevsky dove si occupa di biofisica, con particolare interesse per i neuroni. Nel 1944 inizia a lavorare per il Manhattan Project. Dal 1946 al 1969 è presso la Divisione Matematica degli Oak Ridge National Laboratory, dove si occupa di analisi numerica. Fu presidente dell'AMS, del SIAM e dell'Association for Computing Machinery [cfr. O'Connor e E. F. Robertson 1999; Goode 1969].

“A logical calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity”

Nell'autunno 1941 McCulloch fu assunto presso l'Illinois Neuropsychiatric Institute (INI) di Chicago, dov'era andato a vivere con la moglie. L'INI era parte del complesso medico della Università dell'Illinois a Chicago (UIC; da non confondere con la University of Chicago, UC). All'INI McCulloch stette fino al 1952, quando si trasferì all'MIT Research Laboratory of Electronic (RLE). In questo periodo si occupò di psichiatria, cercandone il fondamento nella neurofisiologia e nella neuroanatomia, a loro volta fondate sulla fisica e la chimica [cfr. McCulloch 1960, p. 3]. McCulloch non amava tanto la sperimentazione, quanto piuttosto la costruzione di modelli teorici e si racconta che passava molto tempo a discutere con i suoi collaboratori presso la biblioteca della sua unità [cfr. Perl 2001, p. 374].

La presenza a Chicago fu anche occasione per McCulloch per entrare in contatto con la Scuola di biofisica di Rashevsky e conoscere Pitts. Sin dal 1938 Pitts aveva stretto un'intima e duratura amicizia con un giovane studente dell'Università di Chicago, Jerome Y. Lettvin; nel 1939 Lettvin era poi passato alla University of Illinois Chicago, per studiarvi medicina con indirizzo neuropsichiatrico ed era divenuto discepolo del neuroanatomista Gerhardt von Bonin (1890-1979), era stato collega di McCulloch già a Yale. Von Bonin nel 1942 presentò McCulloch a Lettvin e, fu probabilmente per il tramite di quest'ultimo che McCulloch scoprì il magnifico intelletto di Pitts. Invitò entrambi ad abitare con di lui all'INI. Nel corso di questa convivenza, tra il 1942 e il 1943, McCulloch e Pitts iniziarono a lavorare sull'articolo che prenderà il titolo di “A logical calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity”.

Per una esposizione dei risultati dell'articolo mi baserò su una serie di conferenze di von Neumann tenute nel dicembre 1949 all'Università dell'Illinois [cfr. von Neumann 1966].³⁶⁵ Occorre premettere la sostanza dell'articolo di Alan Turing (1936) “On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem*”. Turing aveva mostrato come poteva essere rappresentato in maniera rigorosa il concetto di procedimento effettivo, introducendo il concetto di una macchina *A* - che poi sarà detta macchina di Turing - dotata di un numero finito di stati interni, dotata di un nastro infinito su cui una testina può scrivere, leggere, cancellare, spostarsi a destra e a sinistra, e fornita inoltre di un insieme di istruzioni *I*. Per ogni procedimento effettivo esisterà una macchina di Turing *A* dotata una sequenza di istruzioni *I*. Inoltre Turing aveva mostrato la nozione di una speciale macchina *U*, detta macchina di Turing universale, tale che qualora le fossero state fornite le istruzioni *I* di *A*, si sarebbe comportata come *A*, calcolando lo stesso numero calcolato da *A*. In sostanza *U* imita ogni macchina di Turing, anche più complicata di *U* per numero di pezzi che la costituiscono.

Al contrario di Turing (1936), McCulloch e Pitts (1943), in “*A logical calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity*”, introducono una teoria di come può funzionare il cervello. Essi evitano di impelagarsi in più complesse questioni biochimiche, concependo il neurone come un elemento molto semplice definito assiomaticamente, il neurone formale, tale che può assumere solo due stati, eccitato o non eccitato, e la cui azione eccita altri neuroni, fino a che non si eccita qualcosa che non è un neurone, ad es. un muscolo o una ghiandola. Questi neuroni formali a loro volta possono essere combinati per dar luogo a reti molto complesse [cfr. von Neumann 1966, p. 44]. Una rete di neuroni così concepita era in questo senso il corrispettivo neurologico della successione di “psiconi” di McCulloch. Pitts lo aveva aiutato a dar rigore a tale visione. Ciò che essi riuscirono a dimostrare è che ad ogni macchina di Turing può essere fatta corrispondere una rete costruita con i neuroni formali di McCulloch e Pitts. Perciò tutte le computazioni realizzabili con reti neuronali di McCulloch e Pitts, se dotate di nastro infinito,

³⁶⁵ In particolare le cinque conferenze tenute all'Università dell'Illinois nel dicembre 1949 formano la «Part One: Theory and Organization of Complicated Automata», pp. 30-87.

sono coestensive alla Turing computabilità, la quale peraltro è stata dimostrata coestensiva alla λ -definibilità e alla ricorsività generale [cfr. *ivi*]. Tale risultato è stato ribadito da von Neumann anche dopo S. C. Kleene (1951), il rapporto per la Rand Corporation del dicembre 1951 in cui si dimostra che le reti di McCulloch e Pitts calcolano a rigore solo una sottoclasse di problemi Turing computabili, cioè i cosiddetti “eventi regolari”: qualora le reti di McCulloch e Pitts, sosterrà von Neumann già nel 1952, comprendano anche circolarità e vengano dotate di memoria illimitata e della capacità di scrivervi e leggervi, the «logic of constructable machines becomes precisely equivalent to intuitionistic logic», e «in particular, all numbers computable in the sense of Turing can be computed by some such network.» [von Neumann 1956, p. 56].

Reti neurali e feedback

Introducendo una teoria formalizzata del funzionamento del cervello in quanto rete di dispositivi a commutazione, “A Logical Calculus” aveva risposto pienamente alle aspettative di Ortway e di Wiener. Quest’ultimo appena ebbe visto l’articolo di McCulloch e Pitts andò, insieme a Bigelow, a farlo leggere a von Neumann [cfr. Aspray 1990b, nota 13 p. 297]. È interessante notare che a parere di McCulloch (1974) la parte davvero “cruciale” dell’articolo non è tanto quella in cui si perviene alle dimostrazioni appena accennate, ma quella in cui si tratta delle reti di neuroni dotate di circolarità, perché mostrava la possibilità della presenza nel cervello di sistemi a *feedback* positivo in quanto sistemi di memorizzazione. Come scrive McCulloch (1960, p. 10) in un altro luogo:

«we had proved, in substance, the equivalence of all general Turing machines — man-made or begotten.

But we had done more than this, thanks to Pitts’s modulo mathematics. In looking into circuits composed of closed paths of neurons wherein signals could reverberate, we had set up a theory of memory».

Dal punto di vista dell’architettura dei calcolatori, tali *loop* rigenerativi, riverberanti, verranno interpretati come il corrispettivo neurologico delle memorie a linee di ritardo. La sensazione di “crucialità” che ha McCulloch rispetto a questo aspetto dimostra quanto fosse importante per lui la nozione di *feedback*, che per la maggior parte dei non matematici che si avvicinarono a Wiener e von Neumann nel quadro della prima Cibernetica costituì un oggetto di attrazione formidabile, molto più di quanto ciò significasse per von Neumann e per lo stesso Wiener.

Il *feedback* aveva fatto la sua prima folgorante apparizione agli occhi di fisiologi e dei ricercatori delle scienze socio-umane nel corso di una “Conference on Cerebral Inhibition”, patrocinata dalla Fondazione Macy, ed organizzata da Frank Fremont-Smith, direttore della Divisione Medica della fondazione, che si tenne a New York il 14 e 15 maggio 1942.³⁶⁶ Il convegno verteva su una discussione sui riflessi condizionati negli animali e in parallelo sull’inibizione cerebrale, termine eufemistico per intendere la pratica dell’ipnosi sugli esseri uomini,³⁶⁷ ed era stato progettato nella speranza che, come scrisse Fremont-Smith,

«by focussing the discussion upon physiological mechanisms underlying the two groups of phenomena, gaps in our knowledge, as well as correlations, may be more clearly indicated.»³⁶⁸

³⁶⁶ Cfr. Lettera di invito di Fremont-Smith a McCulloch, 27 Aprile 1942 (MCAPS), “Fremont-Smith”, citata da Piccinini (2003) p. 41.

³⁶⁷ L’incontro sulla «Cerebral Inhibition» si tenne al Beekman Hotel di New York i giorni 13-15 maggio 1942, sotto gli auspici della Josiah Macy Jr. Foundation, cfr. Heims (1991, it., p. 17 e n. 1 p. 341). Nell’intervista a Mead e Bateston (1976), il secondo spiega che «“Cerebral inhibition” was a respectable word for hypnosis».

³⁶⁸ Fremont-Smith, Memorandum, 11 maggio 1942 (MCAPS), “Fremont-Smith”. Cito da Piccinini (2003, p. 41).

Come si vede traspare qui l'uso di un approccio comparativo tra animali e uomini, che nella Cibernetica diviene tra animali e macchine. Durante il convegno però Rosenblueth aveva anche dato un'anteprima delle idee che qualche mese dopo sarebbero confluite in "Behavior, Purpose and Teleology". Nella stessa sede McCulloch presentò le proprie idee sulla spiegazione neurale dei fenomeni mentali, compreso l'uso della logica simbolica come modello dell'attività dei neuroni. Si disse d'accordo con Rosenblueth sulla «dependence of 'goal directed' behavior upon 'feed-back' mechanisms».³⁶⁹ Erano presenti anche numerosi psicologi e scienziati sociali, tra cui Gregory Bateson, che ricorderà:

«In 1942, at a Macy Foundation conference, I met Warren McCulloch and Julian Bigelow, who were then talking excitedly about "*feedback*".» [Bateson 1972, p. X] «Most of what was said about "*feedback*" was said over lunch», ha riferito Bateson in un'altra occasione [Mead e Bateson (1976)].

Fu proprio intorno a questo entusiasmo che, nel 1946, fu avviato il ciclo di incontri che diverrà noto come Macy Conferences on Cybernetics.

All'INI McCulloch ebbe in quel periodo la possibilità di approfondire gli aspetti tecnici discussi a New York e all'MIT, mediante lunghi colloqui con Craig Goodwin, l'ingegnere elettrico responsabile del laboratorio elettronico, che aveva l'incarico di occuparsi delle attrezzature elettroniche utilizzate negli esperimenti di neurofisiologia (elettroencefalografia, registrazione di fenomeni bioelettrici ecc.). Goodwin aiutò McCulloch nella comprensione di "On Governors" di Maxwell e della teoria dei sistemi a *feedback* in radiofonia e negli amplificatori reazionati. McCulloch poté ragionare con lui sulle malattie in cui si possono riscontrare *feedback* negativi.

Tra il 1942 e il 1943 Pitts era particolarmente interessato ai problemi della circolarità nei circuiti nervosi. Scrive McCulloch:

«Since there obviously were negative *feedbacks* within the brain, why not regenerative ones? For two years Walter and I worked on these problems whose solution depended upon modular mathematics of which I knew nothing, but Walter did.» [McCulloch 1974]

McCulloch aveva pensato che la presenza di *feedback* positivi potessero spiegare l'attività epilettica di un cervello isolato chirurgicamente. Avrebbe desiderato anche impiegare tale concetto nella spiegazione della causalità secondaria alle amputazioni, nel comportamento compulsivo, nell'ansia e negli effetti della terapia con shock. Anche Lorente de Nó, un neuro-anatomista allievo di Ramon de Cajal, aveva dimostrato l'importanza di tali loop neuronali nella spiegazione nel nistagmo vestibolare (un'oscillazione ritmica involontaria degli occhi) [cfr. McCulloch 1974].

La collaborazione tra Pitts e Wiener

È piuttosto interessante notare che Wiener conobbe Pitts nell'agosto del 1943 [cfr. Wiener 1948, p. 13] e che iniziò a servirsene come assistente in autunno [cfr. *ivi*, p. 14 e Lettvin 2000, pp. 3-4]. Ciò avvenne dunque prima della pubblicazione di "A logical Calculus", che risale al dicembre 1943. L'incontro con Pitts avvenne anche questa volta per via di Lettvin, che andava declamando ai quattro venti le eccezionali doti del giovane amico. Nel 1943, dopo essersi laureato, Lettvin era divenuto allievo a Harvard del neurologo Denny-Brown ed aveva iniziato un internato come medico generico al City Hospital di Boston. Qui venne a contatto con Wiener tramite un lontano parente di quest'ultimo [cfr. Lettvin 2000, pp. 3-4]. Venuto a conoscenza delle abilità di Pitts, Wiener volle incontrarlo per saggiarle e verificare se potesse

³⁶⁹ Lettera di McCulloch a Fremont-Smith, 24 giugno 1942 (MCAPS), "Fremont-Smith". Cito da Piccinini (2003), p. 41.

divenire suo collaboratore. Wiener ha sempre sentito il bisogno di collaborare con una persona dalla mente matematica fresca, che lo aiutasse a sistemare le proprie teorie; così era avvenuto con R.E.A.C. Paley, che Wiener citò in quell'occasione, più recentemente con Bigelow, ma anche con molti altri studiosi. Dopo una breve discussione sui teoremi ergodici Wiener si convinse che Pitts era l'uomo che faceva al caso suo [cfr. Lettvin 2000, p. 4 e Wiener 1948, p. 14].

Piccinini (2003) ha reso note alcune interessanti lettere che permettono di capire come sia avvenuto il distacco di Pitts dalla cerchia di Rashevsky, ed anche di fissare le tempistiche della collaborazione di Pitts con McCulloch e con Wiener. Il 9 agosto 1943 Rashevsky scriveva a McCulloch di essere stato informato da Pitts che dalla fine di agosto, Pitts aveva progettato di lavorare insieme a McCulloch «on the problem of thinking». Rashevsky si diceva d'accordo, ma era anche preoccupato perché attendeva da giorni «the second half of the psychiatry paper». ³⁷⁰ Non è chiaro a quale articolo egli facesse riferimento, se si tratti di “A mathematical theory of the affective psychoses.” [Lettvin e Pitts 1943], apparso sulla rivista di Rashevsky, oppure di un articolo su “A general theory of learning and conditioning”, apparso su *Psychometrika* [Pitts 1943b]. Dalla lettera emerge comunque chiaramente che, alla data del 9 agosto 1943, Pitts non aveva ancora iniziato a lavorare su “A logical calculus”. Di pochi giorni successivi, del 27 agosto, è una lettera di McCulloch a Wiener, in cui si dice:

«Pitts has told me of your offer. I'm delighted, but to lose him at this particular time will be doubly hard on Rashevsky, for whose sake I would be grateful if you would write to him, stating 1) that you know Pitts himself, his work and his academic quandary at Chicago, 2) that it would be possible for him to get his Ph.D. in Mathematics at MIT in a couple of years, 3) that there is a position for him with you beginning (date) at so much per - . Above all, if possible do state that your institution is interested in mathematical biophysics and would like to have this member of his (Rashevsky's) group on that account. Leave me to convince Rashevsky that Chicago has nothing further to offer Pitts in mathematics, and that his going to you is a feather in R[ashevsky]'s cap. I cannot go into details as to Rashevsky's circumstances which at this juncture make me ask of you so much milk of human kindness.

You know that you are hijacking my bootlegged collaborator, and that if you give my name as reference you can only expect hyperbolic extravaganza. Lacking him, I shall probably turn to you both for help with my own naughtiest notions.» ³⁷¹

Pitts era come si vede un giovane molto speciale e molto conteso tra studiosi di altissima statura. Nonostante le preoccupazioni di Rashevsky, in quel giro di mesi portò a termine i due articoli citati sopra, nonché “A Logical Calculus.” Wiener si affrettò ad accaparrarselo: in maniera estremamente celere fece quanto chiestogli da McCulloch. ³⁷² Pitts, nonostante la sua genialità, non aveva a Chicago alcuna sistemazione ufficiale, mentre Wiener gli propose una posizione accademica all'MIT e la possibilità di ottenere in breve tempo un *Ph.D.* in matematica.

Cibernetica e biomatematica

Raccontando di come era iniziata la collaborazione con Walter Pitts, in *Cybernetics* Wiener esprime alcune considerazioni che ci permettono di cogliere le differenze tra la Cibernetica in *fieri* e la biomatematica di Rashevsky. Scrive Wiener:

«He [Walter Pitts] had been a student of Carnap at Chicago and had also been in contact with Professor Rashevsky and his school of biophysicists. Let it be remarked in passing that this group has contributed much to directing the attention of the mathematically minded to the possibilities

³⁷⁰ Lettera di Rashevsky a McCulloch, 9 agosto 1943 (MCAPS), “Rashevsky”. Cito da Piccinini (2003), p. 66.

³⁷¹ Lettera di McCulloch a Wiener, 27 agosto 1943 (MCAPS). Cito da Piccinini (2003), p. 66.

³⁷² Cfr. Lettera di McCulloch a Wiener, 1 settembre 1943 (MCAPS). Cito da Piccinini (2003), p. 67.

of the biological sciences, although it may seem to some of us that they are too dominated by problems of energy and potential and the methods of classical physics to do the best possible work in the study of systems like the nervous system, which are very far from being closed energetically.» [Wiener 1948, p. 13]

L'interpretazione del brano non è agevolissima, tuttavia la differenza cruciale sembra essere data da uno studio di sistemi che possono essere considerati come isolati dal punto di vista energetico e sistemi che invece richiedono fonti di energia ausiliaria, attingibile localmente. In sostanza, mutuando la distinzione che si fa in elettronica, tra sistemi passivi e sistemi attivi.

Tale differenza può essere vista con riferimento a due tipi di terreni fenomenici: da un lato, abbiamo quei sistemi in cui si ha, ad esempio, l'autoregolazione del *ph* nelle soluzioni tampone tanto care a Henderson; oppure i sistemi ecologici in cui si studia, ad esempio, il ciclo del carbonio nella biosfera, o l'andamento delle popolazioni viventi in uno stagno, sistemi di cui parlerà nell'ambito delle Macy Conferences George Evelyn Hutchinson (1903–1991), uno dei padri della nozione di biosfera. In tutti questi casi, anche se non raramente ci si trova in situazioni termodinamicamente lontane dall'equilibrio, ci si trova comunque, più o meno, nella situazione della macchina a vapore originaria di Watt, in cui l'energia prelevata dal regolatore svolge sia la funzione di segnale, che quella dell'alimentazione. Dall'altro lato esistono sistemi che utilizzano elementi attivi, cioè che utilizzano delle fonti locali di energia ausiliare, come i triodi, i relè o i neuroni, in cui la distinzione tra segnale e alimentazione è molto netta. In questi ultimi tipi di sistema emerge una dimensione del tutto nuova, che è il fenomeno informativo. In questo genere di sistemi, sostiene Wiener, le considerazioni energetiche sono molto meno significative.

Wiener vede il modo di pensare del biofisico come un'eredità dell'Ottocento. Scrive più avanti, sempre in *Cybernetics*:

«In the nineteenth century [...] The conservation and the degradation of energy are the ruling principles of the day. The living organism is above all a heat engine, burning glucose or glycogen or starch, fats, and proteins into carbon dioxide, water, and urea. It is the metabolic balance which is the center of attention [...]. All the fundamental notions are those associated with energy, and the chief of these is that of potential. The engineering of the body is a branch of power engineering. Even today, this is the predominating point of view of the more classically minded, conservative physiologists; *and the whole trend of thought of such biophysicists as Rashevsky and his school bears witness to its continued potency.*

Today we are coming to realize that the body is very far from a conservative system, and that its component parts work in an environment where the available power is much less limited than we have taken it to be. The electronic tube has shown us that a system with an outside source of energy, almost all of which is wasted, may be a very effective agency for performing desired operations, especially if it is worked at a low energy level. We are beginning to see that such important elements as the neurons, the atoms of the nervous complex of our body, do their work under much the same conditions as vacuum tubes, with their relatively small power supplied from outside by the circulation, and that the bookkeeping which is most essential to describe their function is not one of energy. In short, the newer study of automata, whether in the metal or in the flesh, is a branch of communication engineering, and its cardinal notions are those of message, amount of disturbance or "noise" — a term taken over from the telephone engineer — quantity of information, coding technique, and so on.» [Wiener 1948, p. 41-42, il corsivo è mio]

Wiener si comporta da scienziato che riconduce le conoscenze dell'ingegneria elettronica sul piano della scienza. Ed è in questo **che nel senso più profondo** la Cibernetica consiste: l'ingegneria elettronica strappata dal piano delle applicazioni e riconcepita sul piano della conoscenza del mondo; come accadde d'altro canto alla termodinamica classica frutto del passaggio dalla pratica delle macchine a vapore alla teoria termodinamica [cfr. principalmente Harman 1982].

I primi passi del rapporto tra Wiener e Pitts

Sintomatico è il fatto che tra le prime visite che Wiener fece fare a Pitts all'MIT, fu quella presso un laboratorio in cui si lavorava sull'elettronica. Racconta in *Cybernetics*, riferendosi all'autunno 1943:

«At that time Mr. Pitts was already thoroughly acquainted with mathematical logic and neurophysiology, but had not had the chance to make very many engineering contacts. In particular, he was not acquainted with Dr. Shannon's work, and he had not had much experience of the possibilities of electronics. He was very much interested when I showed him examples of modern vacuum tubes and explained to him that these were ideal means for realizing in the metal the equivalents of his neuron circuits and systems.» [Wiener 1948, p. 14].

Dunque, in maniera non dissimile da Ortvy, Wiener pensa che il modello a reti neurali si applichi altrettanto bene ai calcolatori. Continua infatti:

«From that time, it became clear to us that the ultra-rapid computing machine, depending as it does on consecutive switching devices, must represent almost an ideal model of the problems arising in the nervous system. The all-or-none character of the discharge of the neurons is precisely analogous to the single choice made in determining a digit on the binary scale, which more than one of us had already contemplated as the most satisfactory basis of computing-machine design.» [ivi].

È interessante notare che, secondo Wiener, era possibile porre un parallelo tra le diverse varietà delle memorie negli animali con «the problem of constructing artificial memories for the machine.» [ivi]. In sostanza la ricerca di McCulloch e Pitts tendeva sempre di più ad assumere un ruolo di bussola nella progettazione del computer.

Wiener inglobò Pitts nella propria cerchia. Pitts fu invitato a frequentare «a seminar on scientific mathematics», che si teneva in privato a casa di Rosenblueth.³⁷³ Nel frattempo si era complicata la situazione accademica di Rosenblueth a Harvard, a causa della malattia del suo maestro e protettore Cannon e si profilò il suo licenziamento. McCulloch gli offrì un posto presso la University of Illinois.³⁷⁴ Il 23 ottobre McCulloch scrisse a Fremont-Smith, che egli aveva continuato tenere informato circa gli sviluppi del programma cibernetico *in fieri*, per chiedergli finanziamenti per un laboratorio per Rosenblueth presso la University of Illinois. Però questa università richiedeva che Rosenblueth, messicano, ottenesse la cittadinanza americana. Infine questi preferì accettare l'offerta di un posto permanente presso l'Istituto Nacional de Cardiologia, a Città del Messico [cfr. Piccinini 2003, pp. 67-8].

Poco dopo Walter Pitts fu dotato di una "top-security clearance", ed andò ad occupare un posto alla Kellex Corporation di New York, per lavorare al progetto Manhattan [cfr. Smalheiser 2000, p. 221].

³⁷³ Lettera di Wiener a McCulloch, 30 agosto 1943. (MCAPS). Cito da Piccinini (2003, p. 67).

³⁷⁴ Cfr. lettera di Rosenblueth a McCulloch del 26 ottobre 1943. Citata da Piccinini (2003, pp. 67-8).

Capitolo 8 – Dal Convegno di Princeton a Hiroshima

L'iniziativa del Convegno di Princeton

Concludendo il passo in cui ci ha raccontato delle convulse consultazioni avvenute nel corso del 1944 con Aiken, von Neumann e Goldstine, *Cybernetics* afferma:

«At this stage of the proceedings, Dr. von Neumann and myself felt it desirable to hold a joint meeting of all those interested in what we now call cybernetics, and this meeting took place at Princeton in the late winter of 1943-1944 [*sic*, in realtà 1944-1945]» [Wiener 1948, p. 15].

La prima idea del Convegno di Princeton sembra sia germinata da un *tête à tête* tra Wiener e Aiken, avvenuto nel corso del “going and coming”. Questo è quanto si evincerebbe da una lettera del 17 ottobre 1944 in cui Wiener scrive a von Neumann:

«I saw Aiken the other day and I am much impressed by the coincidence of his point of view with mine on the future of computing machines. We are thinking of trying to get some meeting of the American Society of the Advancement of Science after the war is over for the discussion of the whole complex problems relating to computing machines, communication engineering, prediction theory, and control engineering. I would like to get your point of view on that».³⁷⁵

Due giorni dopo Wiener scrive anche ad Arturo Rosenblueth del colloquio con Aiken e dell'ipotesi dell'incontro all'American Society of the Advancement of Science, da dedicare al

«complex of subjects in which you and I are interested.» Aggiunge: «If we do that we shall try to make it a matter of invited addresses of perhaps a half an hour each by a mathematician, physiologist, electrical engineer, statistician, etc. Certainly, this wants to be done in such a way that you can participate in it».³⁷⁶

Wiener stava evidentemente pensando di discutere e di dare pubblicità all'idea di quella ingegneria generalizzata delle comunicazioni che era andato maturando dall'epoca dello *Yellow peril* (1° febbraio 1942), e che ora includeva saldamente anche le machine di calcolo. Occorre notare nel confronto tra le due lettere una diversità di accenti: nella prima, la neurofisiologia non compare affatto, mentre nella seconda sembra assumere addirittura un ruolo chiave, nella misura in cui il nuovo campo è inquadrato come quel «complesso di temi» a cui il matematico Wiener e il neurofisiologo Rosenblueth erano interessati.

Riemerge qui la differenza tra la Cibernetica “in grande”, la teoria delle comunicazioni generalizzata e quella “in piccolo”, la neuro-cibernetica. Due accezioni della cibernetica che però convivono insieme almeno fino ad Hiroshima. Occorre tener conto di questa distinzione per comprendere come le attività teoriche che vengono sviluppate in questo giro di mesi, tra la fine del 1944 e l'inizio del 1945 - che possiamo considerare come sforzi verso la costituzione delle moderne scienze computazionali in senso ampio - non sono qualcosa di estraneo alla Cibernetica *in fieri*, almeno nella sua accezione di Cibernetica “in grande”.

Von Neumann condivise evidentemente in maniera piena l'idea della riunione interdisciplinare da tenere intorno alle idee di Wiener ed entrambi, come leggiamo in *Cybernetics*, «felt it desirable to hold a joint meeting of all those interested in what we now call cybernetics, and this meeting took place at Princeton» [Wiener 1948, p. 15]. Von Neumann anzi sembra aver sollecitato l'incremento del numero di componenti, mentre suggeriva un drastico ridimensionamento della risonanza pubblica che si sarebbe voluto dare all'incontro.

³⁷⁵ Lettera di Wiener a Von Neumann, 17 ottobre 1944 (WAMIT) Box 4, 66. Cito da Piccinini (2003 p. 77).

³⁷⁶ Lettera di Wiener a Rosenblueth, 19 ottobre 1944. (WAMIT) Box 4, 66. Cito da Piccinini (2003 p. 78).

Il 4 dicembre 1944 fu inviata una lettera di invito per un incontro, scritta materialmente da Wiener, ma a nome anche di von Neumann e di Aiken. I destinatari erano: Samuel S. Wilks, Walter H. Pitts, Ernest H. Vestine, W. Edwards Deming, Warren S. Culloch, Rafael Lorente de Nó e Leland E. Cunningham; Herman Goldstine fu aggiunto qualche giorno dopo.³⁷⁷ Vi si spiegava che:

«A group of people interested in communication engineering, the engineering of computing machines, the engineering of control devices, the mathematics of time series in statistics, and the communication and control aspects of the nervous system, has come to a tentative conclusion that the relations between these fields of research have developed to a degree of intimacy that makes a get-together meeting between people interested in them highly desirable.

Owing to the war, it is not yet the time to call together a completely open meeting on the matter, because so many researches developed in the war effort are concerned, but it seems highly desirable to summon together a small group of those interested to discuss questions of common interest and make plans for the future development of this field of effort, which as yet is not even named.»³⁷⁸

Come si vede, la “communication engineering” generalizzata di Wiener era posta come sfondo concettuale. La questione del nome per il “nuovo campo” era sentita naturalmente come un importante nodo da sciogliere, anche perché in alternativa ci si vedeva costretti a quell’estenuante elenco di discipline nel quale Wiener, ma anche gli altri, cominciavano a vedere qualcosa di comune, se non si fosse voluto continuare ad usare espressioni come “communication engineering” o “theory of communication”, introdotte da Wiener in un senso nuovo, ma che avrebbero potuto creare equivoci. Scrive *Cybernetics* in proposito:

«Thus, as far back as four years ago, the group of scientists about Dr. Rosenblueth and myself had already become aware of the essential unity of the set of problems centering about communication, control, and statistical mechanics, whether in the machine or in living tissue. On the other hand, we were seriously hampered by the lack of unity of the literature concerning these problems, and by the absence of any common terminology, or even of a single name for the field.» [Wiener 1948, p. 11].

Il problema della scelta del «name for the field» fu ripreso in una lettera del 28 dicembre 1944, dove si proponeva che nel corso dell’incontro si discutesse della fondazione di un’associazione permanente, suggerendo di chiamarla *Teleological Society*; mentre *Teleology*, o un più internazionale *Teleologia*, poteva essere il titolo di un periodico scientifico della società scientifica. La lettera spiegava il motivo di questa indicazione:

«Teleology is the study of purpose of conduct, and it seems that a large part of our interests are devoted on the one hand to the study of how purpose is realized in human and animal conduct and on the other hand how purpose can be imitated by mechanical and electrical means.»³⁷⁹

³⁷⁷ Cfr. la Lettera di Aiken, von Neumann e Wiener a S. S. Wilks, W. H. Pitts, E. H. Vestine, W. E. Deming, W. S. Culloch, R. Lorente de Nó e Leland E. Cunningham, 4 dicembre 1944 (WAMIT). Citata da Hellman (1981, pp. 229-230) e meno ampiamente da Heims (1980, p. 185), il quale chiarisce però che i mittenti ufficiali erano Wiener, Aiken e von Neumann, ma era stata scritta materialmente da Wiener. Con lettera del 16 dicembre 1944 von Neumann chiese a Wiener di aggiungere il nome di Goldstine. (WAMIT), Box 4, 66, citata da Piccinini (2003, p. 79). Ciò chiarisce perché Aspray (1990, nota 46, p. 315) non abbia trovato nell’archivio di Goldstine (HGAPS) la lettera del 4 dicembre: a Goldstine con data 22 dicembre 1944, [citata in Goldstine 1973, p. 275], che è verosimilmente identica a parte la data a quella del 4 dicembre in quanto coincide testualmente nelle parti citate da vari autori. Von Neumann aveva anche scritto a Goldstine il 10 dicembre 1944 (HSRC) [cfr. Aspray 1990, nota 62 p. 263].

³⁷⁸ Lettera Aiken, von Neumann and Wiener *etc.*, 4 dicembre 1944, *cit.* Cito da Hellman (1981, pp. 229-230).

³⁷⁹ Aiken, von Neumann e Wiener a Goldstine [*sic*], 28 dicembre 1944 (WAMIT). Cito da Hellman (1981, p. 231); queste parti della lettera coincidono con quelle più brevi citate da Aspray (1990, p. 183), conservata nell’archivio di Goldstine HGAPS.

L'ordine del giorno prevedeva anche la discussione delle strategie per organizzare un centro di ricerca, la scelta del luogo dove crearlo, i contatti da prendere per il suo finanziamento, la politica da adottare circa brevetti e invenzioni; e, facendo eco al colloquio tra Aiken e Wiener dell'ottobre precedente, si sarebbe dovuto anche discutere di

«what measures should be taken to bring our ideas to general scientific attention either at a meeting of the American Association for the Advancement of Science or elsewhere as may seem suitable; and how to protect the researches of the group from dangerous and sensational publicity».³⁸⁰

Il Convegno di Princeton e i compiti assegnati da von Neumann

L'incontro si tenne infine come previsto il 6 e 7 gennaio del 1945. Aiken fu impossibilitato a partecipare, ma non sembra che si sia ritirato dall'impresa perché fu assegnato ad uno dei quattro gruppi di lavoro formati nel corso dell'incontro. Non sappiamo di altre assenze. In una lettera del 24 gennaio 1945 a Rosenbluth, così Wiener ne riassumeva lo svolgimento:

«was a great success [...]. The first day von Neumann spoke on computing machines and I spoke on communication engineering. The second day Lorente de Nó and McCulloch joined forces for a very convincing presentation of the present status of the problem of the organization of the brain. In the end we were all convinced that the subject embracing both the engineering and neurology aspects is essentially one, and we should go ahead with plans to embody these ideas in a permanent program of research [...] While we are going to meet again in the Spring, we have not organized in a formal permanent society».³⁸¹

Del Convegno von Neumann preparò un “*Summary memorandum of the meeting*”, di cui fu inviata una copia a ciascun partecipante con data 12 gennaio 1945.³⁸² Nel documento non entrava nel merito dei contenuti espressi nelle relazioni, concentrandosi soprattutto sulla divisione dei compiti e sull'agenda futura. Motivava questa decisione nella lettera con cui accompagnava l'invio a Wiener, con il fatto che così il *Summary* avrebbe potuto circolare più liberamente.³⁸³ Vi si asseriva in particolare:

«You will notice that I am not giving in this letter a description of the subject in which we are interested. I thought this to be unnecessary since the enumeration of groups together with the joint letter of Aiken, von Neumann and Wiener of December 4, 1944, give a general idea of this, and anything really detailed would encroach on the province of the memoranda which form the subject of this letter» [von Neumann's *Summary*].

Per capire qualcosa in più dei temi discussi al convegno ed affrontati in dopo di esso dai gruppi di lavoro, è utile guardare alla configurazione assunta dai diversi gruppi. Erano previsti in particolare: un gruppo “1”, per i «Filtering and prediction problems», includente Pitts e Wiener; un gruppo “2” per l'«Application of fast, mechanized computing methods to statistical problems», composto da Deming, Vestine, Wilks e possibilmente von Neumann; un gruppo “3” per l'«Application to differential equations (astronomy, ballistics, hydrodynamics, etc.)», composto da Aiken, Cunningham, Goldstine e von Neumann. Qui von Neumann aveva evidentemente evitato di ripetere la specificazione: “Application of fast, mechanized computing methods to”. Infine c'era un gruppo “4” per i «Connected aspects of neurology», di cui facevano parte Lorente de Nó, McCulloch ed ancora Pitts [cfr. *ivi*].

³⁸⁰ *Ivi*, p. 231.

³⁸¹ Lettera di Wiener a Rosenbluth, 24 gennaio 1945 (WAMIT), cito sulla base delle citazioni di Heims (1980, pp. 185-6); Hellman (1981, p. 231); Aspray (1990, nota 53, p. 316).

³⁸² Cfr. *infra* la nostra nota in Bibliografia.

³⁸³ Lettera di von Neumann a Wiener, 12 gennaio 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7, Norbert Wiener. Questa lettera accompagna due copie del *von Neumann's summary*.

Il *Summary* incoraggiava l'intercomunicazione tra i gruppi, sebbene ciascun gruppo avrebbe avuto il compito di redigere alcuni "*preliminary draft memoranda*", che avrebbero dovuto esser pronti entro tre mesi, dunque per la fine di marzo o l'inizio di aprile del 1945, per poi esser fatti circolare tra i quattro gruppi. Entro sei mesi, dunque entro la fine di giugno o l'inizio di luglio, si sarebbe infine giunti ad un nuovo incontro generale, simile a quello del 6 e 7 gennaio 1945, dove «a joint final memorandum of the research program will be undertaken and a small group put in charge of writing it», sulla base del quale una commissione ristretta avrebbe preparato un resoconto finale congiunto sul programma di ricerca. Scriveva von Neumann:

«While no group need restrict itself only to what it considers its primary interest, each one may feel free to lay the main emphasis on that particular field. A balanced presentation which distributes the emphases properly over the entire subject will be worked out by all groups together subsequently. After these four preliminary draft memoranda are formulated, they should be circulated between the four groups, and a first process of adjustment should be carried out on the basis of the comments obtained at this stage. After this, another meeting of all groups, similar to that of January 6-7, should be called, at which the formulation of a joint final memorandum of the research program will be undertaken and a small group put in charge of writing it.» [*von Neumann's summary*].

La fondazione dell'associazione permanente era stata rimandata al dopoguerra. «The reasons are - si apprende dalla lettera del 24 gennaio 1945 di Wiener a Rosenblueth - that owing to the control of different and by no means unified government departments over parts of our program, it is best not to stir up a fuss until the military situation makes matters of classification less important». Evidentemente erano state rimandate anche le questioni riguardanti la pubblicizzazione delle ricerche e quella del nome. Tuttavia nel corso del convegno era stata ribadito che «however, we definitely do have the intention of organizing a society and a journal after the war, and founding at Tech or elsewhere in the country a center of research in our new field». Si era anche discusso di possibili fonti di finanziamento per il progetto: esisteva una possibilità concreta di borse di studio della J. S. Guggenheim Memorial Foundation, per l'interessamento di uno dei suoi dirigenti, Henry A. Moe; e anche dalla Rockefeller Foundation si sperava di ricevere aiuti attraverso Warren Weaver; inoltre von Neumann aveva qualche idea su una terza fonte di "megadollari" un po' misteriosa da cui "spillare" qualcosa. Comunque Wiener era entusiasta e fiducioso in McCulloch e von Neumann, che riteneva «very slick organizers».³⁸⁴

Anche a causa della scarsità dei documenti, gli interpreti sembrano essere concordi nel ritenere che i gruppi formatisi non abbiano lavorato. Julian Bigelow nel corso di una conversazione con William Aspray ha sostenuto che la Società Teleologica non nacque a causa di un «clash of personalities among the organizers».³⁸⁵ Tuttavia questo "scontro di personalità" non può essere avvenuto, a mio parere, prima della crisi di coscienza di Wiener innescata nell'agosto del 1945 dal bombardamento atomico del Giappone, dato che i sette mesi intercorrenti tra il convegno di Princeton e la fine della guerra furono caratterizzati da una vera e propria luna di miele tra Wiener e von Neumann, come dimostra il carteggio intervenuto tra i due in questi mesi.³⁸⁶ Sappiamo inoltre che nel corso del 1945 Wiener cercò e ottenne

³⁸⁴ Lettera di Wiener a Rosenblueth, 24 gennaio 1945 (WAMIT), citata sia da Heims (1980, pp. 185-6); Hellman (1981, p. 231); da Aspray (1990, nota 53, p. 316).

³⁸⁵ Comunicazione personale di Bigelow ad Aspray del 6 novembre 1987 [Aspray 1990b, p. 302].

³⁸⁶ Per la cortesia della Library of Congress ho potuto ottenere numerose copie del carteggio intercorso in questi mesi tra Wiener e von Neumann, in particolare oltre al citato *von Neumann's Summary* (von Neumann a Wiener 12 gennaio 1945); lettera di von Neumann a Wiener, 1° febbraio 1945; lettera di Wiener a von Neumann a Wiener, 24 marzo 1945; lettera di Wiener a von Neumann, 27 aprile 1945 tutte in (VNLC). A cui si possono

effettivamente da Moe una *fellowship* per Walter Pitts e che nel 1946 la Rockefeller Foundation concesse i finanziamenti per alcuni progetti di Wiener e Rosenblueth, e per un progetto di calcolatore all'MIT. Inoltre Wiener dopo il convegno si diede da fare in maniera energica per trovare la sede per la Società Teleologica, problema che fino all'agosto del 1945 sembrava potersi risolvere nel più semplice dei modi, cioè con l'assunzione di von Neumann presso il Dipartimento di Matematica dell'MIT. Questo progetto saltò molto probabilmente a causa della crisi di coscienza di Wiener dopo Hiroshima. Ritengo, dunque, che non si sia in alcun modo autorizzati a pensare per scarsità di documenti che almeno fino ad agosto del 1945, i gruppi non abbiano lavorato come previsto. Al solito, però, tutto ciò che possiamo proporre al lettore è solo uno scenario plausibile, basato su un certo numero di indizi, scenario da verificare in futuro mediante più approfondite ricerche d'archivio (e forse quando saranno disponibili documenti oggi sotto segreto).

Proviamo intanto a vedere quali erano le persone che afferivano ai diversi gruppi e quali potevano essere più specificamente i loro compiti.

Il gruppo “3”: calcolo numerico e progetto di calcolatori

Del gruppo “3” facevano parte Aiken, il responsabile del centro di calcolo di Harvard, Goldstine, l'ufficiale di collegamento tra BRL e la Moore School, ora impegnato nei progetti dell'ENIAC che dell'EDVAC, e Cunningham, astronomo e astrofisico, proveniente da Harvard, capo della sezione per il calcolo automatico del BRL. Cunningham era tra coloro che al BRL aveva appoggiato la scelta di finanziare l'ENIAC nel 1943, ed abbiamo trovato il suo nome nel rapporto di von Neumann a Oppenheimer del 1° agosto 1944, citato come una delle persone a cui erano stati chiesti consigli al BRL circa le nuove macchine IBM per Los Alamos.

Questi studiosi, insieme a von Neumann, avrebbero dovuto studiare le applicazioni del calcolo automatico veloce alle equazioni differenziali nell'astronomia, la balistica, l'idrodinamica, etc. Non si può escludere che il gruppo dovesse anche interessarsi alla stessa progettazione di calcolatori, attività che in questa fase di sviluppo del computer non si può considerare del tutto autonoma dai metodi di analisi numerica propriamente detti.

Confermerebbe tale ipotesi l'intenzione di von Neumann di invitare nel gruppo “3” persone particolarmente esperte nella progettazione, come Presper Eckert e George Stibitz. Scrive von Neumann a Wiener il 1° febbraio 1945:

«After some discussions with Cunningham and Goldstine I think it would be desirable to add Eckert of the University of Pennsylvania and Chandrasekhar to our group, and possibly also G. Stibitz. I propose to talk to Eckert, and to ask Cunningham to write to Chandrasekhar. Stibitz is now out of our reach (I think somewhere in Texas). I would suggest that we talk his role over when we next meet».³⁸⁷

Questi inviti rientravano nella decisione presa nel corso del Convegno secondo cui ciascun gruppo, a seconda delle sue specificità, avrebbe potuto invitare altre persone. È interessante dunque che von Neumann abbia pensato a Presper Eckert, ingegnere capo sia per l'ENIAC che per l'EDVAC, e in quel periodo principalmente alle prese con il secondo progetto. Si trattava di una persona che von Neumann stimava, tanto che lo avrebbe voluto come ingegnere capo per quello che sarebbe divenuto lo IAS computer, se non fossero poi sorti di lì a poco gli aspri conflitti per i brevetti che dilaniarono per anni il progetto per l'EDVAC. Altrettanta stima von Neumann aveva per George Stibitz, che l'anno precedente egli aveva potuto apprezzare per la competenza nell'architettura di calcolatori seppure a relè dotati di programmi (inseriti

aggiungere altre lettere di Wiener che corroborano questa tesi della “luna di miele” tra i due scienziati, interrotta bruscamente dall'uso dell'atomica sul Giappone.

³⁸⁷ Von Neumann a Wiener, 1° febbraio 1945, VNLC, General Correspondence, Box 7.

attraverso uno dei tre nastri della macchina) e di ingegnose strategie per il controllo e l'autocorrezione degli errori.

Esistono due rapporti di Stibitz, entrambi redatti non come suo solito per la Divisione 7 ma per l'AMP ed in particolare per lo Study 171: "Survey of Computing Machines" [cfr. Weaver 1946, p. VIII]. Erano il rapporto su "Relay Computers" del febbraio 1945 [Stibitz 1945a], dove si esponeva dettagliatamente la teoria dei calcolatori a relè³⁸⁸ ed un altro rapporto, sempre del 1945, dal titolo "A talk on relay computers" [Stibitz 1945b].³⁸⁹ Non sappiamo se questi rapporti si iscrivano nelle attività dei partecipanti al convegno di Princeton, colpisce però che nella lista di distribuzione fossero presenti i nomi di John von Neumann, Norbert Wiener, Warren Weaver, Herman Goldstine, J. G. Brainerd (il direttore amministrativo dell'ENIAC), Howard Aiken e Edmund C. Berkeley (un collaboratore di Aiken) [cfr. Hook *et al.* 2002, p. 457]. Il nome che più sorprende è sicuramente quello di Wiener, visto che compare assai raramente nelle liste di distribuzione dei progetti dell'AMP, almeno stando ai documenti noti.

Non escluderei nemmeno l'ipotesi che uno degli argomenti di discussione del gruppo riguardasse le modifiche da apportare all'ENIAC e la progettazione dell'EDVAC; e che il contenuto del *First draft sull'EDVAC* sia in forte debito con le discussioni avvenute all'interno di questo gruppo, ma anche degli altri gruppi, durante e dopo il Convegno di Princeton.

Per quanto riguarda l'indicazione dell'astrofisico Subrahmanyan Chandrasekhar, von Neumann era da tempo in stretto contatto lui. Entrambi erano stati relatori della 4th Annual Conference on Theoretical Physics su "The problem of Stellar Energy", tenutasi i giorni 21-23 marzo 1938, che si era occupata dei fenomeni della fusione nucleare; tra gli altri relatori c'era stato Teller, padre della bomba H.³⁹⁰ Tra il '42 e il '43 Chandrasekhar e von Neumann avevano collaborato ad un saggio sulla statistica stellare;³⁹¹ dal 1943 Chandrasekhar aveva cominciato a collaborare per il BRL, di cui anche von Neumann era ufficialmente consulente.³⁹² Chandrasekhar aveva anche scritto un'importante saggio su "Stochastic Problems in Physics and Astronomy," pubblicato nel 1943 sotto i buoni auspici di von Neumann.³⁹³ Non mi pare azzardato ipotizzare che l'interesse di von Neumann a coinvolgere tale studioso nel gruppo facesse riferimento alle esigenze matematiche di idrodinamica provenienti da Los Alamos. Sappiamo che Chandrasekhar, nell'ambito del BRL, si occupò principalmente di onde d'urto, che fu il primo argomento di idrodinamica incontrato nella sua carriera, campo che continuerà a studiare in seguito.³⁹⁴ Anche Wiener deve essere stato a stretto contatto con Chandrasekhar, considerando l'entusiasmo con cui accenna alle sue ricerche di statistica stellare in *Cybernetics* [cfr. Wiener 1948, p. 31].

³⁸⁸ Il rapporto è riassunto dettagliatamente in [MDL 1947a].

³⁸⁹ Cfr. il c.v. di Stibitz [Stibitz 1986].

³⁹⁰ Cfr. Chandrasekhar *et al.* (1938) e Gamow e Tuve (1938). Vedi anche Chandrasekhar (1939).

³⁹¹ von Neumann e Chandrasekhar (1943).

³⁹² È noto che ha scritto almeno tre rapporti per il BRL: S. Chandrasekhar, "On the decay of plane shock waves," BRL Report 423, Aberdeen, 1943, Restricted; Chandrasekhar, S. The normal reflection of a blast wave. BRL, Report No. 439, Aberdeen, 1943, Restricted; S. Chandrasekhar, "The normal reflection of a blast wave", Chandrasekhar, S. "On the conditions for the existence of three shock waves," BRL, Report No. 367, Aberdeen 1943, Restricted. Rapporti citati in R. Courant e K. O. Friedrichs, *Supersonic flow and shock waves. A manual on the mathematical theory of non-linear wave motion*. AMP NDRC Contract OEMsr-945, 1944, Confidential, pp. 273, 274, 276. Cfr. nell'edizione declassificata Courant e Friedrichs (1948), pp. 440 e 445.

³⁹³ «my interest in the field of Brownian Motion was to use it as a basis for the theory of stellar encounters» [Chandrasekhar 1977]. E fu con i buoni auspici di von Neumann che egli pubblicò come Chandrasekhar (1943).

³⁹⁴ Rispetto a questa esperienza di guerra Chandrasekhar (1977) ha dichiarato che «it was my first serious introduction to hydrodynamics. I learned hydrodynamics at that time, but it did not have any immediate effect on the work I was doing in astrophysics». In seguito avrebbe pubblicato il volume Chandrasekhar (1961).

Il gruppo “2”: calcolo applicato alla statistica (e alla crittologia?)

Il gruppo “2” era dedicato alle applicazioni del calcolo automatico veloce ai problemi di statistica. Al Convegno era presente Samuel S. Wilks, il personaggio di maggior spicco della statistica matematica americana di quel periodo. Capo consulente del War Preparedness Committee per la Probabilità e la Statistica, ebbe un crescente ruolo tra il 1942 e il 1945 nell’AMP. Diresse lo Statistical Research Group-Princeton (SRG-P), che aveva un ramo a New York (SEG-Pjr). Le sue ricerche riguardavano la previsione del tempo atmosferico e la ricerca operativa applicata al bombardamento e alla guerra sottomarina [cfr. Stephan *et al.* 1965, p. 942].³⁹⁵ Tra le persone che facevano capo a lui c’era L. J. Savage, che ritroveremo alle Macy Conferences on Cybernetics.

Gli altri partecipanti al gruppo “2” erano Ernest H. Vestine (1906–1968), un geofisico e meteorologo, esperto di geomagnetismo, che lavorava presso il Department of Terrestrial Magnetism della Carnegie Institution of Washington, e che divenne esperto di analisi spettrale delle serie temporali - cioè il campo elettivo di Wiener - per quanto riguarda l’evoluzione dei dati paleo-magnetici, ma anche nello studio delle onde sismiche e di quelle prodotte da esplosioni [cfr. Forbush 1980, spec. p. 373; Vestine e Forbush 1953]. Un altro partecipante era W. Edwards Deming, matematico e statistico, con interessi in economia. Aveva lavorato ai BTL fino al 1939 e poi, fino al 1945, fu consigliere statistico dello U.S. Census Bureau. Di altri inviti per il gruppo “2” apprendiamo da una lettera di von Neumann a Deming del 23 gennaio 1945, dove si legge:

«I will certainly be glad to cooperate with the work of the group on statistics. I also think that we ought to have Hotelling. Probably the best procedure will be if I wait until we have accumulated some more names, and then circularize those interested and write invitations. *What you say about the subject in general is very gratifying.*»³⁹⁶

Edwards Deming era stato presente al convegno di due settimane prima ed era tra i destinatari del *von Neumann’s Summary*. Questa lettera è dunque evidentemente una risposta ad una precedente missiva di Deming, forse inviata dopo aver ricevuto il *Summary*, missiva in cui Deming aveva avuto parole di apprezzamento verso il nuovo “*subject*”, che non può non coincidere che con “la scienza senza nome”. Deming doveva anche aver incoraggiato von Neumann ad assicurare la sua presenza ai lavori del suo gruppo, che il *Summary* aveva dato invece per incerta. L’Hotelling di cui si parla è con ogni probabilità Harold Hotelling, uno statistico matematico ed economista che in quel periodo collaborava, tra l’altro, con Bigelow e Savage, alla sezione di statistica dell’AMP di New York, presso la Columbia University.

Il gruppo “1”: Wiener e Pitts

Per quanto riguarda i compiti della coppia formata da Wiener e Pitts l’espressione “problemi del filtraggio e della previsione” è davvero molto generica. Però sappiamo molte cose sulle attività di Wiener e Pitts. Una lettera dell’ottobre 1945 di Wiener all’amico Giorgio Santillana ci permette di conoscere il punto a cui erano giunte le ricerche dei due a quella data. Scrive Wiener a Santillana:

«I have a complete theory of wave filters and predictors for the linear case. These are important elements in control apparatus and in the economic theory of time series».³⁹⁷

³⁹⁵ Poco si sa del contenuto delle sue ricerche legate concernenti previsione del tempo, il progetto “SRG-Pjr” sulla statistica dei bombardamenti. Cfr. Stephan *et al.* (1965, pp. 942-3). Fu anche molto attivo nelle ricerche crittologiche durante e dopo la Guerra, quando divenne consulente dell’NSA.

³⁹⁶ Lettera di von Neumann a Deming, 23 gennaio 1945 (VNLC), in von Neumann (2005). Il corsivo è mio.

³⁹⁷ Lettera di Wiener a Santillana, 16 ottobre 1945, (WAMIT), box 2, folder 69. Cito da Hellman (1981, p. 242).

La teoria della previsione e del filtraggio di Wiener aveva da tempo attratto l'attenzione di economisti matematici e statistici. Una testimonianza di questo interesse è costituita dalla partecipazione di Wiener ad un seminario sulle applicazioni della teoria della previsione in economia, che si era tenuto presso l'MIT Department of Economics and Social Science nel biennio 1942-'43. Tra i relatori c'erano oltre a Wiener, Harold Hotelling, William Feller, Abraham Wald, Paul Samuelson e Richard von Mises [cfr. Klein 1991].³⁹⁸ Allora Wiener si era detto possibilista verso un'applicazione della teoria della previsione alla meteorologia, ma aveva manifestato un certo scetticismo per quanto riguardava i fenomeni economici. Aveva detto:

«The question arises whether the successive elements of any given time sequence can be considered to be the result of repeated applications of a measure preserving transformation. Perhaps this condition is fulfilled for meteorological time sequences because of the stability of the underlying forces. For economic time series, however, this condition is often not fulfilled and caution must be taken in applying the theorem.» [Wiener 1991, p. 329]

Nella fase del Convegno di Princeton, però, evidentemente Wiener era divenuto maggiormente ottimista riguardo alle applicazioni della sua teoria all'economia. Ottimismo che sarebbe scemato di lì a poco, visto che egli avrebbe di nuovo sostenuto alle Macy Conferences on Cybernetics la tesi dell'impossibilità di utilizzare la propria teoria della previsione in economia ed in generale nelle scienze sociali [cfr. Montagnini 2000-2001].

D'altro canto Wiener aveva sostenuto già nello *Yellow peril* che la propria "teoria delle comunicazioni", riformulata in senso informazionistico e stocastico, andava sostanzialmente a coincidere con la statistica delle serie temporali. Concetto ripreso in *Cybernetics*:

«What is not generally realized is that the rapidly changing sequences of voltages in a telephone line or a television circuit or a piece of radar apparatus belong just as truly to the field of statistics and time series, although the apparatus by means of which they are combined and modified must in general be very rapid in its action, and in fact must be able to put out results pari passu with the very rapid alterations of input. These pieces of apparatus—telephone receivers, wave filters, automatic sound-coding devices like the Vocoder of the Bell Telephone Laboratories, frequency-modulating networks and their corresponding receivers are all in essence quick-acting arithmetical devices, corresponding to the whole apparatus of computing machines and schedules, and the staff of computers, of the statistical laboratory.» [Wiener 1948, p. 60]

In questo passaggio è richiamato il "Vocoder", un dispositivo radio-telefonico, conosciuto anche come X-system o SIGSALY (progetto X-61573), sviluppato dai BTL per conto dello US Army Signal Security Agency (SSA), e costituito da un analizzatore e un sintetizzatore della voce umana basato sull'analisi armonica delle frequenze, ed includente un sistema per rendere sicuro il messaggio, detto "*scrambler*" [miscelatore].³⁹⁹ Esso fu utilizzato per le comunicazioni telefoniche tra le più alte autorità di Stati Uniti e Gran Bretagna durante la guerra. Sotto lo stesso codice progetto era stato realizzato anche l'M228 Converter di Busch o SIGCUM per assicurare comunicazioni sicure tra telescriventi basato sul metodo Baudot.⁴⁰⁰ Forse dunque alcuni degli statistici presenti al Convegno di Princeton potevano essere stati mossi anche da un interesse per la crittologia; tra l'altro sappiamo che sia Samuel Wilks che von Neumann, nel dopoguerra, furono consulenti della National Security Agency, erede dei servizi crittologici di Esercito e Marina statunitensi [cfr. Brown 1965].

³⁹⁸ Le relazioni che questi avevano tenuto riguardavano: William Feller su "Stochastic Processes"; Harold Hotelling su "Some Unsolved Problems of Statistical Theory"; Abraham Wald, su "A Problem in Multivariate Analysis"; Paul Samuelson, su "A. Gram-Charlier Series"; Richard von Mises, "The Probability of Occupancy"; Dirk J. Struik, "The Foundations of the Theory of Probabilities" [cfr. Klein 1991].

³⁹⁹ Questa era la denominazione dei servizi crittologici dell'Esercito dal 1943. In precedenza era stata Army Signal Intelligence Service.

⁴⁰⁰ Su questo sistema in seguito Bletchley Park e Arlington Hall lavoreranno insieme [cfr. Gladwin 2003, p. 469].

Le ricerche di Wiener sulla previsione erano andate estendendosi anche nella direzione dei sistemi non lineari. Aggiungeva Wiener a Santillana:

«I have a less complete but well outlined theory on non-linear prediction on an ergodic basis. This has not yet been employed in practice, but it is perfectly capable of such employment in theory».⁴⁰¹

In proposito gli archivi della Difesa americani conservano un rapporto di Wiener dal titolo *Response of a Non-Linear Device to Noise*, scritto per conto del Radiation Laboratory e datato 6 aprile 1942, in cui si discute di un circuito in cui del rumore causale - ad esempio agitazione termica - è somministrato ad un dispositivo non lineare per dedurne informazioni statistiche sulla natura del dispositivo stesso. Tale rapporto dimostra quanto precocemente Wiener avesse iniziato a lavorare sulla teoria che nel 1958 apparirà sistematizzata nel libro *Nonlinear problems in random theory*.⁴⁰²

Nella fase dello *Yellow Peril* la teoria della previsione e del filtraggio di Wiener era ancora lineare; in effetti tutta la teoria dei controlli automatici “classica”, anche nella sistemazione che ne emerge nel 1945, come esemplificata dal manuale di MacColl, si limita ai sistemi lineari e perciò il metodo della *black box* per lo studio di un sistema incognito consiste nello studiarne la risposta in frequenza a segnali di ingresso sinusoidali, metodica che è inapplicabile nel caso di sistemi non lineari. Come dimostra il citato rapporto dell’aprile 1942, però, Wiener aveva proposto molto precocemente di utilizzare nel caso di sistemi non lineari del rumore causale come segnale di prova. Sappiamo che di quest’ultimo metodo si discusse al Convegno di Princeton. McCulloch ricorda che a lui e Lorente de Nó venne sottoposto l’ipotetico problema di studiare un ignoto dispositivo catturato ai tedeschi. Essi proposero di utilizzare segnali sinusoidali, mentre Wiener suggerì di inviare alla *black box* del rumore bianco; ne era seguito un «wonderful duel» tra Wiener e von Neumann, insieme ad un generale entusiasmo per il nuovo campo [cfr. McCulloch 1974].

Dall’incontro tra Walter Pitts, autore con McCulloch del primo modello di cervello basati su reti neurali, e Norbert Wiener, uno dei padri della matematica dei processi stocastici, non poteva inoltre non sfociare uno studio del cervello/computer in senso stocastico. Così dalla lettera in cui Wiener raccontava a Rosenblueth dello svolgimento del Convegno di Princeton apprendiamo anche che «Pitts, has some very fine ideas on the statistical mechanics of nerve nets».⁴⁰³ Questo approccio riceverà nei mesi successivi ulteriori approfondimenti, tanto che Wiener scrive a Santillana:

«since your departure Walter and I have made substantial progress in the theory of random nets of switching devices and find that we are really working in very essential parts of the theory of state of liquids and gases».⁴⁰⁴

In particolare Pitts - come spiega Wiener in una conferenza del 1946 - aveva iniziato a lavorare sull’idea che

«The anatomical picture of the cortex suggests that we may usefully employ statistical methods in the study of its function. This work has been taken up brilliantly by Walter Pitts. He finds that, under many conditions, the approximation to the activity of the cortex should not be made on a basis of rest and the zero basal activity. Proceeding from this, he has developed the wave equations of the cortex. These promise to give an interpretation of the electrocorticogram. He has also suggested the exploration of the connections between the different parts of the cortex by

⁴⁰¹ Lettera di Wiener a Santillana, 16 ottobre 1945, (WAMIT), box 2, folder 69. Cito da Hellman (1981, p. 242).

⁴⁰² Nell’esordio del libro Wiener ricorda di essersi interessato a lungo al «random shot effect as a suitable input for testing non-linear circuits» [Wiener 1958b, p. VII].

⁴⁰³ Lettera di Wiener a Rosenblueth, 24 gennaio 1945 (WAMIT) box 4, folder 67. Cito da Piccinini (2003 p. 69).

⁴⁰⁴ Lettera di Wiener a Santillana, 16 ottobre 1945 (WAMIT) box 2, folder 69. Cito da Hellman (1981, p. 242).

suitable stimulation of regions and the observance of the frequency-response at several points.» [Wiener 1948a, p. 217]

Wiener aggiunge ancora a Santilliana: «the prediction and filter theory which I have developed has led us to see that there are gaps in the present state of quantum theory».⁴⁰⁵ Wiener da anni perseguiva il tentativo di introdurre i propri metodi di matematica dei processi stocastici all'interno della meccanica quantistica. Aveva ripreso queste idee con Walter Pitts; le svilupperà ancora negli anni Cinquanta e Sessanta in collaborazione con Armand Siegel (1953, 1955 e 1956), poi con Giacomo Della Riccia (1964 e 1966), quest'ultimo conosciuto a Napoli, presso la Scuola di Cibernetica di Caianiello.

Il gruppo “4”: Aspetti di neurologia collegati

Forse è del gruppo “4” che sappiamo di meno in assoluto. La presentazione di McCulloch e di Lorente de Nó deve essere stata simile a quella tenuta dal secondo il 17 marzo 1946 al primo dei convegni Macy, in cui de Nó parlerà delle proprietà delle reti di neuroni analoghe a quelle costituite da relè nei calcolatori digitali dell'epoca, esponendo i risultati dell'articolo di McCulloch e Pitts del 1943. Al convegno di Princeton, però, una particolare attenzione doveva essere stata riservata anche ai circuiti riverberanti, considerati come memorie e studiati *in vivo* proprio da Lorente de Nó (1938). Interesse, come già detto illustrando le ricerche di McCulloch, che nasceva dalla forte analogia che era stata intravista con le linee di ritardo introdotte, dopo l'arrivo di von Neumann alla Moore School, come unità di memoria veloce nell'ENIAC e nel progetto dell'EDVAC (cfr. McCulloch 1974). Si potrebbe immaginare che a questo gruppo sia stato aggiunto anche Rosenbluth, il cui invito fu perorato da Wiener.

La ricerca di un linguaggio comune

Pitts doveva partecipare sia alle attività di Wiener che a quelle del gruppo “4”. Von Neumann doveva lavorare con il gruppo “3” e si sperava aderisse anche al gruppo “2”. Non si può escludere che tutti e tre, Wiener incluso, abbiano svolto un ruolo di *jolly*. È interessante rileggere alla luce di ciò il modo in cui *Cybernetics* faccia il resoconto del Convegno di Princeton. Vi si legge:

«Engineers, physiologists, and mathematicians were all represented. It was impossible to have Dr. Rosenbluth among us, as he had just accepted an invitation to act as Head of the laboratories of physiology of the Instituto Nacional de Cardiologia in Mexico, but Dr. McCulloch and Dr. Lorente de No of the Rockefeller Institute represented the physiologists. Dr. Aiken was unable to be present; however, Dr. Goldstine was one of a group of several computing-machine designers who participated in the meeting, while Dr. von Neumann, Mr. Pitts, and myself were the mathematicians. The physiologists gave a joint presentation of cybernetic problems from their point of view; similarly, the computing-machine designers presented their methods and objectives. At the end of the meeting, it had become clear to all that there was a substantial common basis of ideas between the workers in the different fields, that people in *each group* could already use notions which had been better developed by the others, and that some attempt should be made to achieve a common vocabulary.» [Wiener 1948, p. 15. Il corsivo è mio]

Come si vede si fa riferimento a “gruppi” che appaiono dotati di una fisionomia precisa. Non si fa curiosamente nessuna menzione del gruppo “2”, che tra l'altro era costituito da matematici (statistici matematici), mentre si dice che gli unici matematici erano Wiener, von Neumann e Pitts. Tale omissione potrebbe essere stata suggerita dagli aspetti crittologici che sembrano costituire uno degli interessi del gruppo “2”. Non si dimentichi che *Cybernetics* è

⁴⁰⁵ Lettera di Wiener to Santilliana, 16 ottobre 1945 (WAMIT) box 2, folder 69, WAMIT. Citata da Hellman (1981, p. 242).

stata scritta nel 1947 e che ancora oggi le attività crittologiche degli statistici da noi citati restano per lo più segrete.

Il resoconto del convegno che ritroviamo nell'autobiografia del 1956, è ancora più vago per quanto riguarda i nomi, ma sembra sottintendere un processo successivo al convegno in cui si cominciò a pervenire a quel linguaggio comune di cui al convegno si era sentito il bisogno. Scrive Wiener:

«I managed to get a group of neurophysiologists, communication engineers, and computing-machine men together at Princeton for an informal session, and I found on the part of each group a great willingness to learn what the other groups were doing and to make use of their terminology. The result was that very shortly we found that people working in all these fields were beginning to talk the same language, with a vocabulary containing expressions from the communication engineer, the servomechanism man, the computing-machine man, and the neurophysiologist.

For example, all of them were interested in the storage of information to be used later, and all of them found that the word *memory* (as used by the neurophysiologist and the psychologist) was a convenient term to cover the whole scope of these different fields. All of them found that the term *feedback*, which had come from the electronics engineer and was extending itself to the servomechanism man, was an appropriate way of describing phenomena in the living organism as well as in the machine. All of them found that it was convenient to measure information in terms of numbers of yeses or noes, and sooner or later they decided to term this unit of information the *bit*. This meeting I may consider the birthplace of the new science of cybernetics, or the theory of communication and control in the machine and in the living organism.» [Wiener 1956, p. 269]

Qui Wiener indica chiaramente un ampio scambio di idee tra i gruppi formatisi al convegno, tale da provocare l'osmosi linguistica descritta. Sembra probabile che tale processo più che riferirsi alle sole due giornate del convegno, si riferisca ad un periodo di più mesi seguito ad esso. Un interessante esempio di questa osmosi linguistica è costituito, a ben vedere, proprio dal *First draft*, dove si usano in maniera molto disinvolta il termine "*memory*", come pure la parola "*feedback*" ed il linguaggio dei neurologi. Il parto del concetto di "*bit*" fu effettivamente più sofferto, come trasluce dal citato brano di Wiener. Nel *First Draft* l'unità di informazione è data dalla presenza o assenza di uno stimolo, che corrisponde, al tutto o niente del relè, e alla cifra binaria. Asserisce von Neumann: «The (capacity) unit of memory is the ability to retain the value of one binary digit» [*First Draft*, p. 57]. Ancora in una conferenza di von Neumann su "The Principles of Large-Scale Computing Machines" del 15 maggio 1946, dove si spiega che il logaritmo in base due del numero delle alternative possibili come unità di misura della capacità di memoria è stato scelto a motivo delle proprietà di additività che del logaritmo [cfr. von Neumann 1946a, p. 253]. Non si usa ancora però la parola "*bit*". L'introduzione di questo termine si fa risalire a John W. Tukey, uno statistico matematico di Princeton vicino a Wilks, Vestine, Savage, Hotelling [cfr. Tukey 1985], dunque vicino ai membri del gruppo "2" del convegno di Princeton.

L'interesse di Wiener e Pitts per il calcolo digitale e il cervello

Ormai alla data del Convegno di Princeton, von Neumann aveva preso saldamente in mano il tema delle "*computing machines*", come dimostra il fatto che fu lui a tenere la relazione sul tema. Tuttavia si deve pensare che anche Wiener e Pitts abbiano dato un contributo di grande rilievo su questo tema. Wiener era convinto, almeno dalla primavera del 1941, dell'importanza del parallelo tra calcolatori numerici a relè e cervello, quando ne aveva discusso con McCulloch, e su questa strada aveva posto Pitts da quando aveva iniziato a collaborare con lui nell'agosto 1943. Abbiamo anche visto come Wiener e Pitts, con l'aggiunta di Bigelow, si fossero occupati di calcolatori nel corso dell'andirivieni del 1944. In una lettera a Moe, Wiener scrive che Pitts aveva compreso «how definitely his [1943] work bore on the design of

computing machines» e che «plunged into this line of investigation with great enthusiasm».⁴⁰⁶ Inoltre Wiener riferisce nella lettera a Santilliana che:

«in conjunction with Walter [Pitts] and von Neumann, I have very definite ideas as to the relation between computing machines and the brain, mainly that both are in essence switching devices where the conjunction of the particular complexities of open and closed channels offer new channels to be open or closed as the case may be».⁴⁰⁷

Von Neumann stesso riconobbe i meriti di Wiener riguardo al calcolo digitale quando, trovandosi a dover motivare la propria scelta per Julian Bigelow come capo ingegnere per il nascente progetto dell'IAS computer, scrisse:

«He [Bigelow] has a profound interest in automatic computing and control which is clearly a very important asset in this work. Part of his war work was done in one group with Norbert Wiener from M.I.T. whose ideas in this field are very significant».⁴⁰⁸

Vedremo più avanti, discutendo della ripresa del progetto dell'MIT Rapid Arithmetical Machine presso il Center for Analysis di Caldwell, l'alta considerazione che aveva Weaver nei confronti di Wiener in quanto esperto di calcolo digitale. Wiener aveva, però, interesse a coordinare le idee su cervello e computer con quelle sui controlli automatici. Dopo aver letto il "*Summary memorandum of the meeting*", si era affrettato a scrivere a von Neumann:

«I found one thing missing in your assignment of topics: namely, there was no single place where the problem of transition from the computing machine to the control machine was discussed. I think this is one of the most important aspects of our project and as it is closely related to the prediction and filtering problems, I have assumed that it goes to our subcommittee for a report. The issues that come up here are those of transfer from continued data to counted data; of the final transition from counted data to the motion of a shaft effector; and the sensing of the motion of the effector by feed-back or other quasiproprioceptor apparatus. I am quite convinced that feed-back method of proprioceptor needs to be supplemented by apparatus which rather reads the load than merely works with a linear computation of the input and output of the motor apparatus. I have already gone some way towards developing such a theory. I have also taken the liberty of emphasizing that the same type of proprioceptor arises in purely mechanical controls, purely organic controls, and controls with a mechanical and organic part combined together. However, you will see this in our report.»⁴⁰⁹

Von Neumann gli rispondeva il 1° Febbraio 1945, dicendosi desideroso di leggere il *memorandum* che stava scrivendo con Pitts, e annunciandogli che quello del proprio gruppo avrebbe invece richiesto più tempo. Asseriva, inoltre, che si era interrogato anche lui sulla questione della transizione e della mediazione tra processi a conteggio e processi continui, e che avrebbe desiderato discuterne con lui a quattr'occhi nei giorni successivi.⁴¹⁰

Dal punto di vista di von Neumann l'esito di questa riflessione fu, molto probabilmente, il modo in cui il *First Draft* risolvette la questione della comunicazione tra l'insieme di memoria interna, unità di controllo CC e unità aritmetica CA con il supporto esterno R, asserendo che i dati devono defluire dall'input passando sempre da R a M e di qui verso C (cioè CA + CC), e

⁴⁰⁶ Lettera di Wiener a Moe, 6 settembre 1945 (WAMIT) Box 4, folder. 68. Citata da Piccinini (2003, p. 70).

⁴⁰⁷ Lettera di Wiener a de Santilliana, 16 ottobre 1945 (WAMIT), box 2, folder 69. Citata da Hellman (1981, p. 242).

⁴⁰⁸ Von Neumann, "Report of Computer Project," 16 marzo 1946. Cito da Goldstine (1973, p. 252). Secondo Goldstine si tratta probabilmente di un memorandum per Aydelotte [cfr. *ivi* nota 1].

⁴⁰⁹ Lettera di Wiener a von Neumann, 24 gennaio 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴¹⁰ «I am leaving on February 4 for Aberdeen, and on February 6 for the West, and expect to be back in the first days of March. I hope that we shall see each other very quickly thereafter. I am sure it would be very profitable for me at least if we could have another conversation. With best regards, Von Neumann a Wiener, 1° febbraio 1945, VNLC, General Correspondence, Box 7.

mai direttamente da R a C, secondo una dimostrazione che rimanda ad un documento di cui non si sa altro, ma dove non è escluso che potrebbe esserci stato lo zampino di Pitts e Wiener.

Comunque a von Neumann il calcolatore digitale interessava principalmente come macchina per eseguire calcoli, mentre Wiener riteneva indispensabile studiarne il nesso con i controlli automatici; così von Neumann tende a studiare essenzialmente il cervello/calcolatore in sé, mentre Wiener e Pitts lo pongono all'interno di un corpo, naturale o artificiale che sia. Questa prospettiva conduce Wiener a scoprire in maniera precossima l'applicazione del calcolatore digitale all'automazione industriale. Leggiamo nella lettera a Santillana:

«in conjunction with *feedback* and prediction apparatus they [i calcolatori digitali] constitute an adequate central part for automatic control devices such as automatic assembly lines, automatic control of chemical plants, etc.»⁴¹¹

Da questa intuizione Wiener, dalle altezze della sua vasta formazione storico-filosofica, e fu prestissimo in grado di scorgere all'orizzonte l'avvento di una nuova rivoluzione industriale basata su fabbriche interamente automatizzate mediante computer. Leggiamo in *Cybernetics*:

«It has long been clear to me that the modern ultra-rapid computing machine was in principle an ideal central nervous system to an apparatus for automatic control; and that its input and output need not be in the form of numbers or diagrams but might very well be, respectively, the readings of artificial sense organs, such as photoelectric cells or thermometers, and the performance of motors or solenoids. With the aid of strain gauges or similar agencies to read the performance of these motor organs and to report, to "feed back," to the central control system as an artificial kinesthetic sense, we are already in a position to construct artificial machines of almost any degree of elaborateness of performance. *Long before Nagasaki* and the public awareness of the atomic bomb, it had occurred to me that, we were here in the presence of another social potentiality of unheard of for good and for evil. The automatic factory and the assembly line without human agents are only so far ahead of us as is limited by our willingness to put such a degree of effort into their engineering as was spent, for example, in the development of the technique of radar in the Second World War.» [Wiener 1948, pp. 26-7. Il corsivo è mio]

L'elemento che conduce Wiener a queste considerazioni è proprio l'idea che il computer possa essere considerato alla stregua di un cervello. Spiegherà in un successivo testo autobiografico:

«It had become clear to me that the human brain gave some sort of an index of what automatic machinery could do and was subjected to the same principles. I saw that the digital computing machine was primarily a logical rather numerical machine, and could be adapted to the control of factory processes.» [Wiener 1958, p. 116]

Queste idee su calcolatore, cervello e controlli automatici erano a loro volta connesse alle ricerche sulla previsione.

Il punto di vista di von Neumann

Non sappiamo nulla direttamente della relazione tenuta da von Neumann a Princeton. Però possiamo farcene un'idea innanzitutto da ciò che Nelson e Metropolis raccontano su una serie di comunicazioni presentate da von Neumann a Los Alamos nello stesso periodo, in incontri *vis à vis* e nel corso di un ciclo di appositi seminari. Von Neumann illustrò i nuovi sviluppi nel calcolo automatico [cfr. Metropolis e Nelson 1982, p. 351] parlando dell'Harvard Mark I, dei calcolatori a relè sviluppati per conto dei BTL da Stibitz e Williams, e dell'ENIAC. Fece anche conoscere "A Logical Calculus". L'impressione generale che Nelson e Metropolis ebbero era che von Neumann si andasse formando una visione personale sull'intera materia. In particolare mostrava

⁴¹¹ Lettera di Wiener a Santillana, 16 ottobre 1945 (WAMIT), box 2, folder 69. Cito da Hellman (1981, p. 242).

«the technical links between the separate independent developments. He also described his ideas on the computer of the future, outlining his single-address architecture, later implemented in the IAS computer, in the IBM 701, and in other computers.» «In addition to information about digital-computer development, von Neumann told us about conversations he had had with McCulloch and Pitts, who were investigating brain functioning using Boolean algebra. Their ideas stimulated his thinking about advanced, digital concepts; for example, he noted that learning from repetitive doing could be represented by a digital circuit». [Metropolis e Nelson 1982, p. 352 e p. 354]

L'ultima informazione sui computer che apprendono, una delle tesi preferite di Alan Turing, potrebbe suggerire che in questa fase von Neumann avesse conversato su questi temi anche con lui.

Le idee di von Neumann riguardo al computer già nel 1945 si vengono articolando in tre filoni. Il primo riguarda la progettazione stessa dei calcolatori elettronici, attività che si esplica sia in consigli per la modifica dell'ENIAC, sia nella collaborazione al progetto dell'EDVAC. Si tratta di una riflessione che confluisce nel *First Draft of a Report on the EDVAC*, un ciclostilato di 101 pagine fatto circolare dalla Moore School con data 30 luglio 1945, in cui è contenuto un progetto per un nuovo calcolatore digitale secondo principi di grande generalità. Già il 4 dicembre 1944 Goldstine aveva scritto in una lettera ad un superiore:

«As far as EDVAC is concerned, Johnny von Neumann has been working for us as a consultant and has been devoting enormous amounts of his prodigious energy to working out the logical controls of the machine. He has also been very much interested in helping design circuits for the machine».⁴¹²

Nel corso del 1945 si discusse in maniera molto ampia su questa macchina. In quali sedi questo sia avvenuto non è del tutto chiaro. Si è sempre dato per scontato che le discussioni si siano svolte alla Moore School. Come ho già detto non escluderei a titolo di ipotesi di lavoro, che in gran parte (o completamente) il *First draft* sia maturato nel contesto dei lavori dei gruppi formati al Convegno di Princeton.

In una lettera del 12 febbraio 1945 da Los Alamos, von Neumann comunicava a Goldstine:

«I am continuing working on the control scheme for the EDVAC and will definitely have a complete writeup when I return. I am also working on the problem of formulating a two-dimensional, non-stationary hydrodynamical problem for the ENIAC.»⁴¹³

Cosa si debba intendere per “*control scheme*” o “*logical controls*” è controverso. Tali espressioni sono interpretabili al meglio secondo quanto ci viene detto nell'esordio del *First Draft*, e cioè che l'obiettivo è di offrire «the structure of a very high speed automatic digital computing system, and in particular with its logical control» [*First Draft*, p. 1, sottolineato nel testo]. Nel complesso ne risulta un progetto molto dettagliato per un calcolatore effettivamente realizzabile «to perform calculations of a considerable order of complexity - e. g. to solve a non-linear partial differential equation in 2 or 3 independent variables numerically.» [*First Draft*, p. 1]. Anche se traspare l'ambizione di presentare un progetto che fosse il più generale e formalizzato possibile.

Il testo rappresenta certamente la sintesi del meglio che si era scritto e detto fino ad allora al fine di costruire un calcolatore elettronico ad alta velocità e tendenzialmente “general purpose”. In esso si possono contare circa sessanta note che rinviano ad altri scritti rappresentate però da spazi bianchi tra parentesi, che non sono stati mai riempiti, molti dei quali potevano essere rapporti preparati espressamente per von Neumann. Penso in particolare

⁴¹² Lettera di Goldstine a Gillon del 4 dicembre 1944, University of Pennsylvania Archives. Cito da Stern (1980, nota 4 alla p. 353).

⁴¹³ Lettera di von Neumann a Goldstine, 12 febbraio 1944 (in realtà 1945), cito da Goldstine (1973), pp. 195-6.

a molti dei rapporti posti sotto il titolo “AMP Study 171”. Nel corpo del testo si trovano citati solo i nomi di Aiken e Stibitz, entrambi in riferimento ad *escamotage* per eseguire calcoli; due volte è citato a “A logical calculus”, dando l’ordine degli autori invertito rispetto a quello che appare nella pubblicazione a stampa, cioè prima Pitts e poi McCulloch [cfr. *First Draft*, p. 12 e 25]. Tutto il discorso del *First Draft* è armonizzato attraverso l’analogia neuronale, che svolge un ruolo molto più ampio della mera metafora. Il ragionamento si mantiene sempre molto vicino all’idea che il cervello sia a tutti gli effetti un sistema di calcolo basato su reti a commutazione, e da ciò tende a trarre suggerimenti concreti. Si noti per esempio la disinvoltura con cui si maneggia l’analogia neuronale nel seguente passaggio:

«The three specific parts CA, CC together C and M correspond to the associative neurons in the human nervous system. It remains to discuss the equivalents of the sensory or afferent and the motor or efferent neurons. These are the input and the output organs of the device, and we shall now consider them briefly» [*First Draft*, p. 6].

Il testo fa evidentemente anche tesoro dell’idea di programma, che aveva raggiunto il suo massimo nei computer a relè di Stibitz, del quale si utilizzano qui anche le idee sul *checking* degli errori. D’altro canto von Neumann è consapevole che la tecnologia elettronica richiede una riorganizzazione sia del *checking* – perché per i triodi non possono essere usate le stesse procedure adatte ai relè – sia del programma, in quanto un nastro esterno che fornisce ordini costituirebbe un collo di bottiglia. Perciò egli pensa che dati e comandi in codice devono essere inseriti nell’ampia memoria M interna, memoria che può essere costituita prevalentemente da iconoscopi o linee di ritardo; due suggerimenti che possono essere venuti il primo dal *Memorandum sulle EDP* di Wiener, il secondo da McCulloch, Pitts e de N . Tecnicamente tali idee dovevano essere state contemporaneamente discusse con l’RCA per quanto riguarda l’uso degli iconoscopi e con Presper Eckert per quanto riguarda le linee di ritardo.

Dalla chiarezza del *First Draft* spunta, ma prender  vigore solo dal 1946 in poi, un secondo filone di ricerche care a von Neumann, cio  la Teoria degli automi, che non   altro che il modo in cui egli universalizza, idee concrete che andava via via affrontando nella progettazione del computer, generalizzando ulteriormente le dimostrazioni di “On Computable Numbers” di Turing e di “A logical calculus” di McCulloch e Pitts.

Il terzo filone di interessi di von Neumann riguarda le procedure numeriche per le specifiche computazioni e l’idea di una “matematica sperimentale”. Esso   testimoniato da numerosi *memoranda* e conferenze che trovano l’esempio pi  maturo in *On the Principles of Large-Scale Computing Machines*,⁴¹⁴ che sviluppava un rapporto inizialmente realizzato da von Neumann per Warren Weaver prima dell’8 marzo 1945, come «a report on computing machines, including both the ENIAC and EDVAC» [Goldstine 1973, p. 215], dunque molto probabilmente come documento rientrante nello “AMP Study 171”; tale bozza serv  a von Neumann come base per varie conferenze e *memoranda*.⁴¹⁵

Metropolis e Nelson (1982, pp. 355-6) hanno tratteggiato in maniera molto chiara le circostanze e le conseguenze teoriche del lavoro computazionale sviluppato per la

⁴¹⁴ Cfr. lettera di Warren Weaver al Colonnello Ritchie, 8 marzo 1945, citata da Goldstine (1973), p. 191.

⁴¹⁵ Due dei primi documenti di von Neumann in questo senso sono due lettere-memorandum, del 20 e del 24 ottobre 1945, inviate da von Neumann al Commodoro Louis Strauss (20 ottobre e 24 ottobre 1945, VNLC, pubblicate in von Neumann (2005, pp. 234-6 e pp. 236-9). Forse serv  anche per la relazione tenuta da von Neumann alla prima Macy Conference del 17 marzo 1946, e sicuramente per la conferenza del 15 maggio 1946 dal titolo “The Principles of Large-Scale Computing Machines,” [von Neumann 1946]. Infine serv  come base per un articolo che doveva essere redatto insieme a Goldstine, richiesto dall’editore L. R. Ford dell’*American Mathematical Monthly*, la cui prima bozza era del 5 novembre 1946, ma che non fu mai portato a termine e la cui versione pi  avanzata sar  pubblicata in come [Goldstine e von Neumann 1963] nelle *von Neumann’s collected works*. Cfr. il racconto di Goldstine (1973, p. 215-6), nonch  Williams (1989) e Stern (1989).

progettazione della bomba atomica tra il 1943 e il 1945. Si trattava di impostare ex-novo procedure numeriche. Inoltre ci si era scontrati con il problema della stabilità delle soluzioni numeriche delle EDP, con quello della propagazione degli errori numerici, con quello del numero di cifre significative da adottare in una fase in cui, oltretutto, non era ancora a disposizione il metodo della virgola mobile, che venne infine introdotto nelle macchine di Stibitz, ma che non era utilizzato in quelle della IBM, le quali costringevano ad un estenuante controllo passo passo degli esiti intermedi della computazione.

Inoltre, come osservano ancora Metropolis e Nelson (1982, p. 348), «the new field of experimental mathematics was entered, with computation stimulating new analytical approaches». Si trattava dell'idea che il lavoro computazionale non dovesse essere solo una scorciatoia per aggirare problemi matematici, ma che i risultati computazionali, offrendo le soluzioni di un problema, potessero anche offrire la possibilità di trovare nuovi metodi analitici per risolverlo.

Il lavoro computazionale di von Neumann è costantemente accompagnato da profonde riflessioni profonde sulla natura dei problemi matematici che si trovava a trattare. Già in un *Memorandum* da lui inviato a Veblen il 26 marzo 1945 su “Use of variational methods in hydrodynamics”, egli si interroga sui motivi delle difficoltà che si incontrano in problemi che *prima facie* non sembrano essere idrodinamici e che si rivelano estremamente difficili e da trattare numericamente. In quel periodo riteneva che le difficoltà dipendessero soprattutto dal fatto che si trattasse di EDP [von Neumann 1945]. In seguito si convinse che esse dipendevano invece prevalentemente dalla non linearità di questi fenomeni [cfr. von Neumann 1946a].

Emerse così l'idea di una “matematica sperimentale”, che divenne il principale stimolo che lo spinse a progettare nel dopoguerra un calcolatore in ambito accademico. Documenti preziosi in questo senso sono le due lunghe lettere che von Neumann inviò al commodoro Strauss, in cui illustra in maniera larga e profonda i diversi tipi di problemi matematici che si sarebbero potuti trattare con i computer ad alta velocità.⁴¹⁶

Intanto a Los Alamos ...

È utile vedere cosa stesse parallelamente accadendo in altri due contesti, strettamente correlati ai lavori di Princeton, almeno dal punto di vista di von Neumann: Los Alamos e la Moore School. Nella già citata lettera del 1° febbraio 1945, von Neumann comunica a Wiener che il 4 febbraio si sarebbe recato presso il BRL di Aberdeen e poi che dal 6 febbraio sarebbe stato nel «West». Sarebbe tornato a Princeton ai primi di marzo. Concludeva:

«I am leaving on February 4 for Aberdeen, and on February 6 for the West, and expect to be back in the first days of March. I hope that we shall see each other very quickly thereafter. I am sure it would be very profitable for me at least if we could have another conversation.»⁴¹⁷

Il “West” corrispondeva ai laboratori di Los Alamos, infatti il 12 febbraio 1945 era da lì che von Neumann scriveva a Goldstine, offrendogli una serie di indicazioni circa lo sviluppo dei lavori alla Moore School.⁴¹⁸ Tutte le attività di von Neumann svolte nel corso del 1944 e del 1945, almeno fino a Hiroshima e Nagasaki, avevano molto probabilmente come fine principale le esigenze computazionali di Los Alamos, ed anche il Convegno di Princeton, come i colloqui che lo prepararono e le attività immediatamente successive non possono non essere inquadrare – almeno dal punto di vista di von Neumann – a prescindere da ciò che contemporaneamente

⁴¹⁶ Cfr. le lettere di von Neumann a Strauss, 20 e 24 ottobre 1945 (VNLC), in von Neumann (2005), pp. 234-236 e 236-239.

⁴¹⁷ Lettera di von Neumann a Wiener, 1° febbraio 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴¹⁸ Lo sappiamo di certo perché Goldstine (1973, pp. 195-6) ci informa che il 12 febbraio 1945 von Neumann gli aveva inviato una lettera da Los Alamos.

avveniva in quel Laboratorio, sebbene von Neumann iniziasse già a far progetti per il dopoguerra, e fosse in essenza uno scienziato, il quale, dunque, come Wiener, amava riportare gli aspetti applicativi su un piano conoscitivo di grande generalità.

A Los Alamos per tutto il 1944 le ricerche teoriche si erano concentrate soprattutto sulla bomba al plutonio e sul problema dell'innescò dell'implosione. I primi mesi del 1945, fino al bombardamento del Giappone, non possono considerarsi come un periodo in cui si poteva rallentare la ricerca in quel senso. All'inizio del 1945 Oppenheimer fissò per la fine di luglio la data di scadenza per il completamento delle bombe all'uranio e al plutonio. Entro quella data si prevedeva che dai centri di produzione industriale sarebbe giunta una quantità di uranio sufficiente per *Little Boy*, progetto circa il quale a Los Alamos non sussistevano da tempo interrogativi teorici rilevanti. Si riteneva anche che sarebbe stata disponibile una quantità di plutonio sufficiente sia per *Fat Man*, la bomba al plutonio da usare effettivamente, sia per un test di prova su scala 1:1. Mentre alla preparazione dei materiali fissili erano deputati i centri di produzione industriale, l'agenda di Oppenheimer a Los Alamos era tutta concentrata sulla bomba al plutonio e sul suo test. Per essa entro febbraio dovevano essere ultimate le ricerche di fisica; entro marzo doveva essere pronto il sistema di esplosivi per realizzare l'implosione. [cfr. Davis 1968, it p. 240]. In giugno Bethe e Christy ultimarono le stime dei parametri teorici [cfr. *ivi* p. 243] ed infine il test della bomba al plutonio fu eseguito il 16 luglio 1945, nella base aerea di Alamogordo, nel New Messico, in località Trinity, producendo secondo le attese un'esplosione di 21 chilotoni.⁴¹⁹ Soltanto dopo questo test si ebbe la certezza dell'efficacia del metodo e si seppero anche valutare le conseguenze dell'esplosione. Il 6 agosto 1945, infine, fu bombardata Hiroshima e il 9 agosto Nagasaki [cfr. ad es. Frank et al. 1997].

Intanto alla Moore School ...

Alla Moore School, alla fine del 1944, si era proceduto ad una ripartizione dei ruoli: da un lato, si sarebbe continuato a sviluppare l'ENIAC in maniera tale da poterlo utilizzare al più presto; dall'altro si sarebbe lavorato al progetto dell'EDVAC. Nella lettera del 12 febbraio 1945 da Los Alamos, von Neumann discute con Goldstine dei metodi di immissione ed emissione dei dati dell'ENIAC, ragionando sulla conversione da decimale a binario e viceversa, e del sistema ottale. Inoltre propone di utilizzare due tipi di piccoli pentodi.⁴²⁰ Tali proposte evidentemente servivano per migliorare l'affidabilità della macchina dell'ENIAC, che si voleva divenisse funzionante in tempi rapidi, e le ritroviamo anche nel *First Draft*.⁴²¹ Nella stessa lettera von Neumann annunciava di stare

«continuing working on the control scheme for the EDVAC and will definitely have a complete writeup when I return. I am also working on the problem of formulating a two-dimensional, non-stationary hydrodynamical problem for the ENIAC».⁴²²

Ciò testimonia l'alto grado di avanzamento a cui era già l'ENIAC, coerentemente con quel che riferiscono Metropolis e Nelson, secondo i quali «in early 1945» von Neumann chiese a Frankel e Metropolis di utilizzare l'ENIAC «to perform the very complex calculations involved in hydrogen bomb design» [Metropolis e Nelson 1982, p. 353].

Sembra inverosimile, però, che lo scopo di queste computazioni riguardasse la bomba H in quanto tale. Questa bomba era, in quella fase, sicuramente non prioritaria. Indipendentemente

⁴¹⁹ Un chilotone corrisponde all'energia liberata da mille tonnellate di TNT. La stima che la bomba avrebbe prodotto tale potenza esplosiva era già contenuta nel cosiddetto in [Serber 1943, p. 1]

⁴²⁰ Lettera di von Neumann a Goldstine, 12 febbraio 1944 [in realtà 1945]. Citata da Goldstine (1973), pp. 195-6.

⁴²¹ Vi si spiega che al posto dei flip-flop possono essere usati dei pentodi [*First Draft*, p. 14 (sezione 5.1)] e si entra nel merito della conversione decimale-binaria [*First Draft*, pp. 15-6 e 55 (sezioni 5.2 e 11.5)].

⁴²² Lettera di von Neumann a Goldstine, 12 febbraio 1944 [in realtà 1945]. Citata da Goldstine (1973), pp. 195-6.

dalle ragioni morali che in genere si adducono per giustificare la bassa priorità posta da Oppenheimer riguardo al progetto, occorre considerare che essa comunque richiedeva una bomba a fissione per essere innescata, e proprio quest'ultimo punto era ancora in questione all'inizio del 1945. D'altro canto, Goldstine ci assicura che la computazione riguardava un problema «of great importance, since it was to test out a dramatic new idea for Los Alamos» [Goldstine 1973, p. 214]. E Metropolis in un'intervista ha chiarito:

«We tried to run a set whose ensemble would enable us to make certain inferences about what the prospects were for the possibilities of thermonuclear ignition» [Metropolis 1987].

In attesa che da tutta questa faccenda sia totalmente tolto il segreto militare, a mio parere, è più probabile supporre, dunque, che tali computazioni riguardassero la valutazione delle conseguenze dell'esplosione di una bomba a fissione ed in particolare la verifica dell'ipotesi dell'“ignizione dell'atmosfera”, ovvero del rischio che le temperature prodotte dall'esplosione delle atomiche a fissione potessero avviare una reazione a catena di fusione termonucleare dei nuclei leggeri costituenti l'atmosfera. Frankel e Metropolis si recarono presso la Moore School già nella primavera del 1945 [cfr. *ivi*] per lavorare sull'ENIAC, e le computazioni, sotto la supervisione di Teller, continuarono fino ai primi mesi del 1946 [cfr. Goldstine 1977, p. 226]. Di fatto esiste un rapporto dell'agosto 1946 di Konopiski, Marvin e Teller su “Ignition of the atmosphere with the nuclear bombs.” [Konopiski *et al.* 1946]. Non c'è dubbio che le stesse computazioni possono poi anche essere state il preludio per la costruzione della bomba H vera e propria,⁴²³ ma sembra provabile che, nel 1945 e probabilmente prima di Hiroshima e Nagasaki, l'ENIAC e tutte le forze intellettuali allora disponibili dentro e fuori Los Alamos, siano state utilizzate per descrivere nei dettagli tutto il corso della reazione, dall'implosione al suo effetto finale in atmosfera, compreso il problema del temuto incendio termonucleare dell'atmosfera terrestre.

Wiener e von Neumann nel 1945

Il carteggio Wiener-von Neumann della Library of Congress registra un vuoto dal 1° febbraio alla fine di marzo. Poi il 24 marzo Wiener scrive a von Neumann complimentandosi:

«our meeting last Monday was a grand success, and hope we shall have many more of them. Veblen told me about your post-war plans for hydrodynamics ».⁴²⁴

L'espressione “grand success” non si addice ad un incontro a quattr'occhi. È più agevole pensare che ci si riferisca ad un convegno. Basandosi sul calendario perpetuo, si scopre che il lunedì precedente corrispondeva al giorno 19 marzo 1945, e sappiamo che in quella data si tenne allo IAS di Princeton un convegno su “Shock-waves and Supersonic Flow”, dove von Neumann aveva tenuto una relazione su “Refraction, Intersection and Reflection of Shock Waves”.⁴²⁵ Non possiamo dire nulla con certezza, ma l'incontro potrebbe ricollegarsi ancora al lavoro dei gruppi del convegno di Princeton. La sede, l'Institute for Advanced Study di Princeton, spiega anche come Wiener abbia potuto incontrare Veblen, una sua vecchia conoscenza e che dello IAS era uno di padri fondatori.

Nella lettera Wiener, anche considerando i progetti sullo sviluppo di un calcolatore in ambito accademico che von Neumann aveva in mente per il dopoguerra, lo incoraggiava a lasciare l'IAS. In questa nuova situazione, egli considerava, von Neumann aveva iniziato a vedere in maniera nuova il rapporto tra matematica pura e applicata, ed ora aveva bisogno non

⁴²³ D'altro canto per esempio Fitzpatrick (1999, spec. p. 118) accetta l'affermazione che la prima serie di computazioni condotta sull'ENIAC fosse per la Superbomba.

⁴²⁴ Lettera di Wiener a Von Neumann, 24 marzo 1945 (VNLC), General Correspondence, Box 7.

⁴²⁵ Conference on Supersonic Flow and Shock Waves, pp. 4-12. AM-1663, 16 luglio [VNCW6, pp. 300-308].

tanto di tornare in una «ivory tower» come l'IAS, ma di avere a che fare con laboratori. Gli comunicava inoltre di aver parlato di lui un paio di volte con George R. Harrison, il preside della Facoltà di scienze dell'MIT,⁴²⁶ in vista di una sua possibile assunzione come direttore del Dipartimento di matematica dell'MIT, al posto dell'anziano Henry B. Phillips⁴²⁷ in procinto di pensionamento.⁴²⁸ Wiener proponeva a von Neumann inoltre che l'MIT divenisse la sede della nuova Società scientifica, sebbene considerasse uno svantaggio il fatto che, per il lato fisiologico, ci si sarebbe dovuti appoggiare alla Harvard Medical School, che era divenuta ormai a suo parere una istituzione principalmente clinica; però, semmai, si sarebbe potuto convincere l'MIT a istituire un piccolo programma di studi fisiologici.⁴²⁹

Si vede perciò come i disegni per il dopoguerra di von Neumann e quelli di Wiener sembravano felicemente intrecciarsi e ciò nel quadro della “scienza senza nome”. Nella lettera Wiener annunciava anche che il 31 del mese sarebbe partito per Città del Messico, dove avrebbe soggiornato dal 9 aprile in poi presso l'Instituto Nacional de Cardiologia.⁴³⁰ Colpisce il fatto che Wiener si sia allontanato dagli Stati Uniti per oltre due mesi, senza portare con sé Walter Pitts. Probabilmente Pitts non poteva seguirlo a causa dei propri obblighi a New York con la Kellogg Corporation; in ogni caso una partenza così anticipata rispetto alla data di Guadalajara, da un lato si spiega con la volontà da parte di Wiener di stare presso Rosenblueth, dall'altro ci suggerisce che le ricerche con Pitts concordate al Convegno di Princeton era state ultimate.

Dalle lettere di questi mesi tra Wiener e von Neumann emerge, come si è già detto, una vera e propria luna di miele tra i due. Il 12 aprile Wiener scrive a von Neumann assicurandolo di avere passato una lettera di quest'ultimo alle autorità competenti, probabilmente per l'assunzione all'MIT. Wiener gli confessava «your attitude has gratified me enormously».⁴³¹ Nel corso del viaggio Wiener fa una sosta presso la Washington University di Saint Louis, dove si adopera per trovare un'eventuale sede per la Teleological Society. A conferma di quanto il progetto fosse ancora vivo è la perorazione che Wiener fa in una successiva lettera a von Neumann perché nella futura associazione fosse attribuito a Rosenblueth un ruolo di rilievo: «we must remember – gli ricorda Wiener – that the main stimulus to our idea of a tie-up between engineering and physiological problems comes from Dr. Rosenblueth, and that he must be given a main role in our plans».⁴³²

È interessante notare come, ancora in una fase in cui era ormai diventato senza dubbio la persona più esperta al mondo in fatto di calcolatori, von Neumann proseguisse la sua assidua raccolta di spunti e di idee. In una lettera a Wiener del 21 aprile 1945 gli racconta di essere stato all'MIT per discutere della propria assunzione; ma quello che lo aveva affascinato più di tutto era stato l'incontro con Richard Taylor. Scrive von Neumann:

«I was in Cambridge and saw R. Taylor and the Tech mechanico-electronic analyzer, we spent two days together. It was very interesting, particularly considering what Taylor might do in the future. We should by all means have a talk 'à trois.' I think there is more to learn from Taylor than from Aiken—and not on analyzers only or mainly».⁴³³

⁴²⁶ George Russell Harrison (1898-1979) Professore di Fisica 1930-1964, Direttore del Research laboratory for Experimental Physics 1930-1942, preside della “School of Science” dal 1942 al 1964.

⁴²⁷ Henry Bayard Phillips direttore del dipartimento di matematica (1934-1947). Invece che da von Neumann sarà poi sostituito da William Ted Martin (1947-1968).

⁴²⁸ Lettera di Wiener a Von Neumann, 24 marzo 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴²⁹ Cfr. *ivi*.

⁴³⁰ Cfr. *ivi*.

⁴³¹ Wiener a Von Neumann, 12 aprile 1945, VNLC, General Correspondence, Box 7.

⁴³² Lettera di Wiener a Von Neumann, 27 aprile 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴³³ Lettera di von Neumann a Wiener, 21 aprile 1945 (WAMIT). Cito da Aspray (1990), nota 6 p. 267.

La lettera conferma da un lato la particolare intimità stabilitasi in questo periodo tra von Neumann e Wiener, che si impenna su progetti della Cibernetica “in grande”. D’altro canto era il tempo dei progetti per il futuro. Il dopoguerra ormai si sentiva alle porte, la presa di Berlino, con il suicidio di Hitler avviene il 30 aprile 1945, cioè solo 9 giorni dopo la lettera.

The mathematical formulation of the problem of conduction

Il viaggio di Wiener in Messico era motivato dalla sua partecipazione al Congresso della Mexican Mathematical Society, che si sarebbe tenuto a Guadalajara dal 28 maggio al 2 giugno 1945.⁴³⁴ Qui Wiener colse anche l’occasione per tenere lezioni e conferenze di matematica (sulla teoria della previsione lineare, su quella non lineare, sull’analisi di Fourier, sui teoremi ergodici e sulla teoria dei numeri), e soprattutto per avviare una collaborazione con Rosenblueth sulla «mathematics of nerve conduction».⁴³⁵

Wiener risiedette per oltre due mesi presso l’Istituto National de Cardiología de Mexico, diretto dal dott. Ignacio Chávez, dove Rosenblueth era responsabile del Department of Physiology [Wiener 1948, p. 17]. E fu avviata una collaborazione «with Rosenblueth in the study of the applications of the theory of networks of sensitive tissues to the flutter and fibrillation of the heart.»⁴³⁶ Una ricerca i cui risultati iniziali furono presentati già al congresso di Guadalajara e poi in forma compiuta nell’articolo uscito nel 1946 su “The Mathematical Formulation of the Problem of Conduction of Impulses in a Network of Connected Excitable Elements, Specifically in Cardiac Muscle”. Per il valore paradigmatico nella storia della Cibernetica *in fieri* assunto da tale lavoro, almeno agli occhi di Wiener e Rosenblueth, è utile soffermarsi su di essa con qualche dettaglio.

Il programma della ricerca fu discusso da Wiener e Rosenblueth insieme allo stesso Walter B. Cannon - che morì poco dopo, il 1° ottobre 1945 - approfittando di una sua visita a Rosenblueth. Essi venne inteso come la prosecuzione di uno studio sperimentale già avviato da Rosenblueth e Cannon tra il 1941 e il 1942,⁴³⁷ dove era stata studiata la risposta a stimolazioni del tessuto nervoso centrale in alcuni animali, simile alla fase clonica della forma di epilessia conosciuta come grande male, contraddistinta da violente contrazioni muscolari ritmiche e, a livello elettroencefalografico, da rapide sequenze di picchi in tutte le derivazioni EEG.⁴³⁸ La bibliografia di Rosenblueth tra il 1942 al 1944 mostra come egli avesse continuato a studiare sperimentalmente risposte ritmiche oltre che che nel tessuto nervoso anche in quello muscolare striato. Il lavoro di Rosenblueth e Wiener (1946) si può dunque vedere come una iscrizione di Wiener nell’ambito di ricerca fisiologica di Rosenblueth. In esso si presero in considerazione due forme patologiche del ritmo cardiaco: il flutter e la fibrillazione atriale. In entrambi i casi la frequenza media delle stimolazioni che avvengono a livello atriale è molto più elevata che nel ritmo normale (il cosiddetto “ritmo sinusale”), anche se il flutter è regolare, con intervalli costanti, mentre la fibrillazione atriale è contraddistinta da periodi variabili e sostanzialmente casuali.

Sebbene la ricerca avesse dato buoni risultati anche per la descrizione delle due patologie, il suo principale scopo era la messa a punto di metodi che potevano essere utili per studiare soprattutto fenomeni riguardanti le reti nervose. Si approfittava del fatto che nel muscolo

⁴³⁴ L’invito venne a Wiener da Manuel Sandoval Vallarta, della Comisión Instigadora y Coordinadora del congreso [cfr. Wiener 1948, p. 16]; Cfr. anche lettera di Wiener a Von Neumann, 24 marzo 1945 (VNLC), General Correspondence, Box 7.

⁴³⁵ Lettera di Wiener a von Neumann, 27 aprile 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴³⁶ Lettera di Wiener a Santilliana, 16 ottobre 1945 (WAMIT) box 2, folder 69. Citata da Hellman (1981, p. 242).

⁴³⁷ Cannon e Rosenblueth pubblicano nel 1942 due ricerche: Rosenblueth e Cannon (1942) e Rosenblueth *et al.* (1942); cfr. anche McC. Brooks *et al.* (1972b, p. 180).

⁴³⁸ Questa fase fa seguito ad una precedente detta “fase tonica”, contraddistinta da forti contrazioni muscolari.

cardiaco gli stimoli si diffondono in maniera simile alla corteccia cerebrale, ma senza comportare la complessa situazione che si viene a creare nelle reti nervose a causa della trasmissione transinaptica, com'era stata descritta in prima approssimazione da McCulloch e Pitts (1943). Il tessuto cardiaco può essere considerato come continuo, anche se la conduzione dello stimolo vi conserva importanti somiglianze con quella nervosa, come la legge del tutto o niente, l'utilizzo di una fonte di energia locale per la ripolarizzazione, una intensità costante dell'impulso che si propaga, ecc. [cfr. Rosenblueth e Wiener 1946]

Nonostante la maggiore complessità della conduzione nel tessuto nervoso, «compared with the cardiac muscle, one may select out of the responses mediated by the nervous system some which bear a close formal analogy to those of the heart» [Rosenblueth e Wiener 1946, p. 512]. In particolare il fenomeno patologico del flutter è visto come l'analogo delle catene chiuse dei neuroni riverberanti, che erano state poste alla base dei meccanismi di memoria a breve termine nelle riflessioni dei cibernetici; la fibrillazione invece è considerata come l'analogo della fase clonica del grande male [ivi, p. 513].

L'articolo appare simile agli altri di Rosenblueth per rigore sperimentale.⁴³⁹ Wiener vi contribuisce con una forte matematizzazione, introducendo delle equazioni di conduzione per il *flutter*, spiegato sulla base di assunzioni assiomatiche, soprattutto quella secondo cui la propagazione dell'impulso avverrebbe a velocità costante sempre lungo lo stesso percorso chiuso. Per la fibrillazione si assume invece che l'impulso viaggi entro percorsi apparentemente casuali senza periodicità, e le equazioni introdotte si basano in gran parte sulle idee espresse nell'articolo di Wiener e Wintner (1943) su "Discrete Chaos". Tale studio statistico delle proprietà di reti casuali fu esteso da Pitts alle reti neurali [cfr. Wiener 1948, p. 17], e divenne oggetto della sua tesi di dottorato.

Un fatto che colpisce nella ricerca di Wiener e Rosenblueth è l'uso disinvolto del metodo comparativo, volto a cercare analogie sia tra gli stessi sistemi fisiologici in animali anche molto diversi (mammiferi, rettili, invertebrati), sia tra fenomeni dotati di somiglianze formali all'interno del medesimo organismo (corteccia cerebrale e muscolo cardiaco). A ben vedere, si tratta di un metodo naturale per un fisiologo sperimentale come Rosenblueth, che tende a studiare l'uomo utilizzando animali per ovvi motivi etici oppure per avere modelli sperimentalmente più agevoli da trattare. In fondo, dal punto di vista di Rosenblueth, l'utilizzo di modelli artificiali non è che un'ulteriore estensione di tale approccio. Si ritrova qui il metodo di Behavior, Purpose and Teleology, dove si avevano modelli artificiali messi a confronto con esseri viventi. Come ho evidenziato nel commentare quell'articolo [cfr. *infra*, nonché Montagnini 2010], un punto fondamentale è costituito dal fatto che l'uso di modelli serve comunque per pervenire a congetture che devono poter essere sottoposte a prova. Ciò è detto in maniera esplicita nelle conclusioni della ricerca di cui stiamo discutendo:

«The importance of this type of study is that it exhibits the implications of the theories analyzed and supplies a basis for their adequate experimental test.» [Rosenblueth e Wiener 1946, p. 56].

Su tale metodo Rosenblueth e Wiener scrissero, forse sempre durante questo comune soggiorno Messicano, un breve articolo su *The role of models in science* in cui si distingue appunto tra "modelli materiali", espressione con cui si indica l'adozione di un fenomeno analogo ma più semplice (animale o artificiale), e "modelli formali", con cui si intende il concetto più classico di modello matematico. Si discute anche la capacità ed i limiti dei modelli nell'offrire conferme sperimentali.

Tra giugno e luglio 1945, che la guerra stesse per concludersi era nell'aria. Il 28 aprile 1945 era stato ucciso Mussolini, il 30 aprile i sovietici avevano preso il Reichstag e Hitler si era

⁴³⁹ Gli esperimenti furono condotti da Rosenblueth in collaborazione con J. García Ramos.

suicidato, il 26 giugno era stata approvata la Carta delle Nazioni Unite, tra il 17 luglio e il 2 agosto si tenne l'ultimo vertice interalleato, la conferenza di Potsdam, da dove il 26 luglio il neopresidente Truman (che era stato vicepresidente di Roosevelt, ed era divenuto presidente alla morte di questi il 12 aprile) aveva intimato la resa del Giappone, con il documento conosciuto come "Potsdam Declaration". Era dunque chiaro ai più che la guerra, in un modo o nell'altro, stava per chiudersi a breve.

Wiener tornò negli Stati Uniti alla metà di giugno. Il 26 giugno Rosenblueth gli inviò il manoscritto sulla conduzione cardiaca perché potesse essere commentato da altri, in particolare da Pitts. Nella lettera di accompagnamento Rosenblueth aggiungeva che il lavoro «was so successful that it would be a shame not to renew it and continue it. Indeed, I think it is rather urgent that we go on with what we have started and allied topics.»⁴⁴⁰

All'inizio di luglio Wiener si recò a parlare con Henry Moe sia dei piani relativi al nuovo campo, sia di una *fellowship* per permettere a Pitts di conseguire il *Ph.D.* all'MIT, dal momento che era ormai prossima la fine del rapporto con la Kellex Corporation.⁴⁴¹ Moe si mostrò interessato al progetto ed inviò i moduli per la borsa di studio di Pitts.⁴⁴² Nello stesso mese Wiener e Pitts si recarono da McCulloch all'Illinois University. McCulloch riferirà a Rosenblueth che i due «were full of your experiments and Wiener's calculations on the theory of flutter and fibrillation and they showed me swell manuscripts under way.»⁴⁴³

All'apice dell'entusiasmo, alle soglie di Hiroshima

L'entusiasmo di Wiener era alle stelle, in particolare guardando alle prospettive aperte dal "campo ancora senza nome", così ricco di novità e promesse. Un aspetto importante per la riuscita dei progetti riguardanti questo campo era ricoperto certamente dall'assunzione di von Neumann all'MIT, che era ormai da ritenersi come la più probabile sede della "Teleological Society" o di come altro la si sarebbe voluta chiamare. Il 1° luglio 1945 Wiener scrive a Rosenblueth:

«I have had several consultations with von Neumann [...] and it really looks to me now as if the appointment and his acceptance were in the bag».⁴⁴⁴

Il 11 luglio, aggiunge:

«it is quite clear that if the appointment comes through, all of our ideas concerning an organized collaboration between physiological and mathematical subjects will follow as a matter of course.»⁴⁴⁵

Lo stesso giorno confida ad un'altra persona:

«Johnny has been and gone and it looks as though he is in the bag. Everybody is delighted and we are going to go places».⁴⁴⁶

Wiener era pronto, dunque, insieme ai suoi collaboratori, a gettarsi a lavorare con spirito atletico, nel nuovo campo emerso durante in quei cinque anni, dalle ricerche sui predittori previsione fino a quelle sul computer. Il 22 luglio 1945 Wiener scrisse a Rosenblueth di

⁴⁴⁰ Lettera di Rosenblueth a Wiener, 26 giugno 1945 (WAMIT) Box 4, folder 68. Cito da Piccinini (2003, p. 84).

⁴⁴¹ Non è da escludere che Pitts abbia svolto la propria attività presso la Kellex Corporation, nella veste di coscritto. Dopo Pearl Harbor il servizio militare obbligatorio prevedeva l'arruolamento degli uomini tra i 18 e i 45 anni per la durata di 18 mesi.

⁴⁴² Lettera di Wiener a Rosenblueth, 11 luglio 1945 (WAMIT) Box 4, folder 68. Citata da Piccinini (2003, p. 84).

⁴⁴³ Lettera di McCulloch a Rosenblueth, 20 settembre 1945 (MCAPS), folder Rosenblueth. Citata da Piccinini (2003, pp. 84-5).

⁴⁴⁴ Wiener a Rosenblueth, 1° luglio 1945 (WAMIT), cito da Heims (1980, p. 188).

⁴⁴⁵ Lettera di Wiener a Rosenblueth, 11 luglio 1945 (WAMIT). Cito da Aspray (1990, nota 4 p. 267).

⁴⁴⁶ Lettera di Wiener a Gretel, 11 luglio 1945 (VNLC). Cito da Aspray (1990, nota 5 p. 267).

progettare un proprio ritorno in Messico. Il manoscritto della loro ricerca intanto era stato sottoposto anche all'esame critico di von Neumann prima di rimandarlo a Rosenblueth per la pubblicazione.⁴⁴⁷

Una testimonianza dell'entusiasmo di Wiener è costituita da una curiosa lettera del 26 luglio, in cui risponde in maniera amplissima ad un giovane studente che gli aveva chiesto indicazioni su quali fossero i campi di studio più promettenti per il futuro. Gli spiegava Wiener:

«I do happen to have in view certain fields which are obviously going to be important in the near future and which I have an interest in developing. One of these is the region in which physiology and mathematics come together. In particular, both in the nervous system and in such muscular systems as the heart, we possess at present a great deal of information as to the mode of interaction of individual fibers where they make contact with one another. We possess, however, far too little an acquaintance with the way in which these elementary actions pile up into an organized behavior.»⁴⁴⁸

Si trattava qui del programma di neuro-Cibernetica avviato a Città del Messico in primavera con Rosenblueth, connesso però con la Cibernetica "in grande". Wiener continuava, infatti, insistendo sul fatto che lo studio futuro della biologia avrebbe richiesto conoscenze di fisica, matematica, biochimica ed una strumentazione elettronica. Aggiungeva:

«Closely related to the problem of the analysis of organization in living tissue is a problem of the synthesis in organization in such devices as computing and control machines.»⁴⁴⁹

Prevedeva anche «a revision of statistical theory in which the procession of events in time is fully considered».⁴⁵⁰ La guerra stava dunque finendo e Wiener si trovava con una visione unitaria. Quella che abbiamo definito Cibernetica "in grande", cioè il coacervo bioispirato di informatica, teoria dei controlli automatici ed ingegneria delle comunicazioni, trattato con gli strumenti statistici di quella che Wiener chiamava "meccanica statistica gibbsiana", poteva bene sussistere accanto a ricerche più specifiche neuro-cibernetica, una Cibernetica "in piccolo", più strettamente biomatematica e con un forte accento sperimentalistico che Rosenblueth gli avrebbe impresso.

Il progetto fortemente desiderato da von Neumann per un calcolatore elettronico a fini eminentemente scientifici e perciò da costruire in ambito accademico, si inseriva bene in questo contesto. Anche i modelli matematici messi a punto da Wiener e Pitts per lo studio delle reti nervose e cardiache avrebbero avuto abbondante bisogno dei nuovi strumenti di calcolo.

Wiener nemmeno si sognava, però, qual era il modo in cui i vertici politico-militari degli Stati Uniti avevano scelto per mettere la parola "fine" alla guerra, cioè con il bombardamento atomico di Hiroshima del 6 agosto 1945 e quello di Nagasaki 9 agosto. Quest'evento sconvolse profondamente le sorti della cibernetica e segnò il modo stesso di intenderla.

⁴⁴⁷ Cfr. lettera di Rosenblueth to Wiener, 3 settembre 1945 (WAMIT) citata da Piccinini 2003, p. 86.

⁴⁴⁸ Lettera di Wiener a Lawrence Weller, 26 luglio 1945 (WAMIT). Cito da Hellman (1981, p. 241).

⁴⁴⁹ *Ivi*, p. 242.

⁴⁵⁰ *Ivi*.

Appendice II.1: La linea di Ritardo ⁴⁵¹

Si tratta di un dispositivo in cui un segnale elettrico attraverso dei cristalli subisce una trasduzione in un segnale ultrasonico che viene trasmesso attraverso un fluido, per poi essere ritrasdotto in un segnale elettrico. Il segnale elettrico viaggia ad una velocità prossima a quella della luce, cioè 300.000 m/sec, mentre un segnale acustico procede ad una velocità molto più bassa. Si produce così un ritardo che è funzione della lunghezza del tubo e della natura del liquido. La prima linea di ritardo era stata introdotta da William B. Shockley dei BTL ed utilizzava una miscela costituita prevalentemente di acqua. Pesper Eckert nell'estate 1943, nell'ambito del cosiddetto progetto PL del Radiation Laboratory dell'MIT, riguardante un amplificatore a larghissima di banda [cfr. Emslie *et al.* 1948], aveva proposto di sostituire del mercurio all'acqua. Dato che un'onda acustica attraversa il mercurio alla velocità di 1450 m/sec, una linea di ritardo al mercurio lunga 1,45 metri provoca dunque un ritardo di esattamente un millisecondo. Pesper Eckert pensò che si poteva utilizzare tale dispositivo come un veloce sistema per lo stoccaggio provvisorio dei dati. Si può montare il tubo in modo che il segnale elettrico rientri continuamente dall'output all'input, amplificandolo per compensare la perdita d'energia.

In questo modo si può rappresentare "1" con un impulso di 0,5 μ sec e "0" con l'assenza di impulso. Una linea di ritardo da 1,45 metri avrà la capacità di 1.000 cifre binarie. Eckert introdusse delle "porte" (*gates*) che permettevano di interrompere la circolazione dei dati, leggerne il contenuto, azzerarlo o immettere nuovi dati. Secondo le stime di costo di Goldstine una linea di ritardo poteva costare come 1/100 di una unità di stoccaggio costituita da flip-flop.

⁴⁵¹ Si segue l'esposizione molto chiara e precisa di Goldstine (1973), pp. 188-190.

Parte 3. La Cibernetica nel Dopoguerra

Capitolo 9 – La “scienza senza nome” si dà delle strutture

La crisi di coscienza di Wiener

Lì per lì non sembra che Wiener abbia risentito più di tanto delle notizie ancora frammentarie sul bombardamento atomico del Giappone. Ancora l'11 agosto 1945 egli riferiva a Rosenblueth il solito ritornello su von Neumann, «Johnny was down here the last two days. He is almost hooked.»⁴⁵² Durante la visita all'MIT, von Neumann lo aveva anche rassicurato sulla coerenza interna del manoscritto sulla conduzione nel muscolo cardiaco.⁴⁵³ Tre giorni dopo, arrivò a von Neumann anche l'offerta da parte di Harrison per un posto di professore di matematica all'MIT, che contemplava uno stipendio buono, di 15.000 dollari, e l'impegno alla nomina di direttore del Dipartimento di Matematica, dopo il pensionamento di Phillips.⁴⁵⁴

Tuttavia, man mano che le notizie dal Giappone diventavano più precise e con il dissolversi dei comuni fumi emozionali dovuti alla gioia per la fine della guerra, Wiener iniziò a ragionare e a comprendere meglio le circostanze. Il suo animo iniziò a rabbuiarsi, per precipitare infine in una acutissima crisi di coscienza. Già nella lettera dell'11 agosto aveva confidato a Rosenblueth che «in the present almost certain to come interval between wars (and I hope to goodness it will be a long one) I think we can do an enormous amount with our new schemes.»⁴⁵⁵

Aveva il presentimento, comune a molti spiriti illuminati del tempo, che la fine della guerra non sarebbe stata che il preludio ad una terza guerra mondiale. Sperava solo che si trattasse di un *interim* lungo, per poter coltivare nella maniera migliore i nuovi progetti. Seguì, però, una ulteriore lettera, e nella risposta Rosenblueth cercava di consolarlo:

«You sounded rather pessimistic in your last letter. That is wrong. The war could not possibly be going better [...] Your work seems to be going along beautifully from what you tell me. Your family is doing handsomely. Our projects, although still in the realm of the "we shall see" are alive and kicking (or maybe I should say, and wagging their caudal appendage). Your novel is still trying to crack its shell. You have friends and they don't forget you — witness thereof, the pleasant time I'm having writing to you. What the Avernus can you crab about, anyhow? It's really a great world and a great life, my dear Norbert, notwithstanding their occasional infirmities.»⁴⁵⁶

Di fronte agli occhi di Wiener si erano aperte le porte dell'Averno. Come nel 1942, aveva avuto un amaro risveglio dalle sue entusiastiche ricerche. Questa volta la visione della realtà si tingeva dei toni apocalittici del bombardamento nucleare, che aveva cancellato la vita di circa 200.000 persone, in gran parte civili, ed aveva una vaga sensazione di essere stato complice inconsapevole. Il 21 ottobre 1945 scriveva il fisico Daniel Q. Posin ad Albert Einstein:

«Here at the Massachusetts Institute for Technology, Wiener stands aghast—as though a man in a confused dream — and wonders what we must do, and he protests at scientific meetings the “Massacre of Nagasaki” which makes it easier, for some, to contemplate other massacres.»⁴⁵⁷

⁴⁵² Lettera di Wiener a Rosenblueth, 11 agosto 1945 (WAMIT). Cito da Heims (1980, p. 188).

⁴⁵³ Cfr. *ivi*.

⁴⁵⁴ Cfr. la lettera di Harrison a von Neumann, 14 agosto 1945 (VNLC), citata da Aspray (1990, nota 5 p. 267).

⁴⁵⁵ Lettera di Wiener a Rosenblueth, 11 agosto 1945 (WAMIT). Cito da Heims (1980, p. 188).

⁴⁵⁶ Lettera di Rosenblueth a Wiener (WAMIT) 66. Cito da Masani (1990, p. 198). La data della lettera non è chiara; Masani la colloca nell'agosto 1944, senza indicazione del giorno. Ritengo più coerente in base al suo contenuto collocarla come faccio qui nell'agosto 1945. Oltretutto Masani retrodata di un anno anche il Convegno di Princeton collocandolo nell'inverno 1943-'44. Resta naturalmente una scelta congetturale.

⁴⁵⁷ Lettera di Posin a Einstein, 21 Ottobre 1945, citata da Nathan e Norden (1968), p. 342; cito a mia volta da Heims (1980, pp. 188-9).

Il 18 ottobre 1945 Wiener presentò una lettera di dimissioni al rettore Karl T. Compton, asserendo di voler

«to leave scientific work completely and finally. I shall try to find some way of living on my farm in the country. I am not too sanguine of success, but I see no other course which accords with my conscience».⁴⁵⁸

Le motivazioni della crisi traspaiono nella lettera scritta negli stessi giorni all'amico Santillana, la stessa più volte citata nella Seconda parte del presente lavoro, in cui Wiener faceva l'elenco dei risultati che aveva per le mani e che fino a qualche mese prima formavano il suo orgoglio e la base per i progetti del dopoguerra, mentre ora gli bruciavano fra le mani. Wiener spiegava:

«Ever since the atomic bomb fell I have been recovering from an acute attack of conscience as one of the scientists who has been doing war work and who has seen his war work a[s] part of a larger body which is being used in a way of which I do not approve and over which I have absolutely no control. I think the omens for a third world war are black and I have no intention of letting my services be used in such a conflict. I have seriously considered the possibility of giving up my scientific productive effort because I know no way to publish without letting my inventions go to the wrong hands».⁴⁵⁹

Ciò che a Wiener scottava di più erano gli stessi risultati ottenuti, che sebbene in maniera ancora non completamente definitiva costituivano la sostanza della Cibernetica stessa. Gli scottava soprattutto che essi finissero, o già immaginava che fossero finiti, nelle “mani sbagliate”, una espressione che tornerà più volte sotto la sua penna.

Che la crisi, comune ad altri scienziati atomici, sia stata causata dal rimorso per la sua partecipazione al Manhattan Project sarebbe la spiegazione più piana. A rigor di termini, però, come abbiamo già detto, non è noto nessun documento in cui Wiener abbia ammesso esplicitamente di aver collaborato alla costruzione della bomba; si può solo congetturare che egli abbia avuto il sospetto di avervi partecipato indirettamente.

Dopo Hiroshima e Nagasaki, comunque, Wiener deve aver avuto discussioni con qualcuno, forse con lo stesso von Neumann, che gli aveva illustrato la profondità del lavoro teorico svolto a Los Alamos. Scrive infatti Wiener nell'autobiografia:

«Of the splendid technical work that was done in the construction of the bomb there can be no question. Frankly, I can see no evidence of a similar high quality of work in the policy-making which should have accompanied this» [Wiener 1956, p. 305].

Dunque Wiener faceva tanto di cappello di fronte alla raffinatezza delle ricerche di Los Alamos, e non è difficile indovinare che comprendesse come anche la “scienza senza nome” avesse contribuito a tale raffinatezza. Quando infine riuscirà a dare un nome a tale scienza, la Cibernetica nascerà necessariamente connotata dai toni cupi che tale consapevolezza o presentimento gli ispiravano. Leggiamo in *Cybernetics*:

«Those of us who have contributed to the new science of cybernetics thus stand in a moral position which is, to say the least, not very comfortable. We have contributed to the initiation of a new science which, as I have said, embraces technical developments with great possibilities for good and for evil. We can only hand it over into the world that exists about us, and this is the world of Belsen and Hiroshima. We do not even have the choice of suppressing these new technical developments. They belong to the age, and the most any of us can do by suppression is

⁴⁵⁸ Lettera di Wiener a Karl T. Compton, 18 ottobre 1945 (WAMIT) box 2, folder 69. Citata da Galison (1994, p. 254) e da Heims (1980, pp. 188-9). Entrambi gli autori ipotizzano che non sia mai stata inviata e restata allo stato di bozza.

⁴⁵⁹ Lettera di Wiener a Santillana, 16 ottobre 1945 (WAMIT) box 2, folder 69. Cito da Galison (1994, p. 253). Cfr. anche la citazione di Heims (1980, p. 188).

to put the development of the subject into the hands of the most irresponsible and most venal of our engineers» [Wiener 1948, p. 28].

È estremamente significativo ciò che Wiener aggiunge subito dopo questo apocalittico brano. Scrive:

«The best we can do is to see that a large public understands the trend and the bearing of the present work, and to confine our personal efforts to those fields, such as physiology and psychology, most remote from war and exploitation» [Wiener 1948, p. 28].

La sua scelta, nella sostanza, è di restringere la Cibernetica alla fisiologia e alla psicologia, cioè al programma neuro-cibernetico, a quella che abbiamo chiamato Cibernetica “in piccolo”, e ciò sia per motivi etici che di contenuto. Si può commentare che considerare fisiologia e psicologia come lontani dalla guerra sia una pia illusione. Ma nel caso di Wiener era soggettivamente motivata. Egli trovava nelle ricerche e nell’amicizia con Rosenbluth un rifugio sicuro. Era stato così già dopo il risveglio del 1942, lo divenne ancor di più dopo il 1945. Con una serie di scelte successive Wiener, ritirate le dimissioni dall’MIT, prenderà sempre più le distanze dalla Cibernetica “in grande”, ed in primo luogo dai grandi progetti per la costruzione di computer. Si spiega così perché “cyber” vuol dire per noi soprattutto computer, ma quando è applicato a Wiener, sembra significare tutt’altro. Aspetto questo che è stato ben colto da Philippe Breton (1987, it. p. 143).

La Conference on Advanced Computation Techniques. MIT 1945

È significativa in tal senso l’assenza dell’intervento di Wiener alla “Conference on Advanced Computation Techniques”, che si tenne tra Harvard e l’MIT, organizzata dal National Research Council, tra il 29 e il 31 ottobre 1945,⁴⁶⁰ dunque dieci giorni dopo la lettera di dimissioni. In questo convegno Caldwell parlò del Rockefeller Differential Analyzer e dei progetti futuri del suo MIT Center of Analysis; Williams, l’ingegnere che aveva lavorato con Stibitz, delle macchine a relè dei BTL; Aiken dei calcolatori di Harvard; Brainerd e Presper Eckert dei principi dei calcolatori elettronici ad alta velocità; W. J. Eckert e L. J. Comrie delle loro pionieristiche esperienze nel calcolo scientifico. Fu una sorta di ricapitolazione di tutto il cammino fatto dal computer fino a quella data.

Il convegno potrebbe essere anche visto come l’avverarsi del progetto di presentazione pubblica immaginato un anno prima da Aiken e Wiener, ma Wiener, l’autore del *Memorandum sulle EDP*, il capo consulente per il calcolo, al primo convegno sui computer, che si teneva al MIT, sua sede da 26 anni, non tenne nessuna comunicazione, sebbene fosse presente nell’elenco dei partecipanti, o almeno - se disse qualcosa - non se ne ha notizia.⁴⁶¹ A ben vedere il convegno non consisteva nemmeno nella progettata presentazione della “scienza senza nome”, che Wiener, Aiken e von Neumann avevano rimandato alla fine del 1944; piuttosto si trattava di un consesso formato principalmente da ingegneri, che presentavano il computer al

⁴⁶⁰ Convegno organizzato dal Subcommittee Z (On Calculating Machines and Mechanical Computation) del National Research Council Committee on Mathematical Tables and Other Aids to Computation e composto da L. J. Comrie, J. C. P. Miller, S. H. Caldwell, G. R. Stibitz, H. H. Aiken, I. A. Travis, D. H. Lehmer e J. R. Womersley [cfr. Archibald 1946].

⁴⁶¹ Dopo il messaggio di benvenuto del rettore Compton, Vannevar Bush fece una introduzione. F. J. Maginniss parlò su “Some Industrial Applications of Machine Computing Methods”, seguì S. B. Williams, l’ingegnere che aveva lavorato con Stibitz, che parlò di “Numerical Computation by the Use of Telephone Relays”. Poi J. G. Brainerd e Presper Eckert su “Some Principles of Electronic High Speed Computing”, mentre von Neumann su “A General Summary and a Look at the Future”. Seguirono le relazioni di H. H. Aiken e collaboratori su “The Automatic Sequence Calculator”; G. A. Philbrick, “Simulative Techniques as an Aid to Analysis”; W. J. Eckert “Application of Punched-Card Methods to Scientific Computation”, by S. H. Caldwell, “The M.I.T. Center of Analysis Research Program”; L. J. Comrie, “The Scientific Application of Commercial Calculating Machines”. [Cfr. Archibald 1946].

mondo come il frutto di meri tentativi tecnici, senza quel quadro teorico entro il quale l'ENIAC era stato modificato e il *First Draft* sull'EDVAC redatto. Oltre a quella di Wiener, tra le voci che non si udirono va anche segnalata quella di Stibitz, pur presente, sostituito come relatore dal suo ingegnere. Von Neumann tenne una relazione su "A General Summary and a Look at the Future", ma non sembra gli sia stato dato il rilievo dovuto, visto che fu fatto parlare tra tanti altri, e dopo Brainerd e Presper Eckert. In tal senso si perdeva non solo il quadro di riferimento cibernetico, ma il solito precario equilibrio tra ingegneri e scienziati tornava a pendere pesantemente a favore dei primi. Vedremo che la stessa difficoltà si ritroverà riguardo ai primi computer inglesi.

L'atteggiamento etico di von Neumann e Wiener di fronte alla guerra

Il bombardamento di Hiroshima e Nagasaki non aveva certamente preso di sorpresa von Neumann, che era tra i pochi ad essere a conoscenza di tutto, e che aveva fatto parte insieme a Oppenheimer del comitato ristretto incaricato di individuare gli obiettivi su cui gettare le bombe atomiche. Le computazioni di von Neumann erano state anche utili per stabilire a quanti metri dal suolo le bombe dovevano esplodere per produrre la massima devastazione.

Sia per von Neumann che per Wiener, gli anni di guerra erano stati un periodo di entusiastico impegno scientifico. Nessuno dei due era un pacifista per partito preso. Occorreva combattere Hitler e questo era sufficiente a muovere entrambi, che tra l'altro erano ebrei. Ma la reazione agli eventi di Hiroshima e Nagasaki fu opposta. Von Neumann la vide come il coronamento di tutti i suoi sforzi scientifici: con la guerra aveva maturato il gusto per la scienza applicata ed il suo entusiasmo continuò nei mesi successivi senza batter ciglio. Il 9 dicembre 1946, rispondendo a Lewis Strauss, che si era congratulato con lui per il conferimento della Medal of Merit, per meriti di guerra, gli confidava:

«I need not tell you that I am very highly gratified by this recognition, although I cannot help feeling, over and above the normal knowledge of personal inadequacy that all I did during the war were per se very interesting and stimulating intellectual pursuits. Actually, the war introduced me to great parts of mathematical physics and applied mathematics which I had neglected before, and I feel that I received intellectually a good deal more than I gave.»⁴⁶²

Per Wiener, il bombardamento atomico fu l'occasione per un nuovo drammatico risveglio alla realtà. Anche ora, come nel 1942, doveva tristemente accorgersi che persone in cui aveva posto la propria fiducia lo avevano tradito:

«When I began to emerge from my sheltered life into the scientific confusion of wartime, I found that among those I was trusting were some who could not be held to any trust. I was badly disillusioned more than once, and it hurt» [Wiener 1956, p. 272].

Von Neumann e Wiener dal punto di vista etico, politico e caratteriale erano molto diversi. L'uso delle atomiche furono indubbiamente il primo atto della guerra fredda contro l'URSS. Wiener non era comunista, ma era amico di studiosi, come ad esempio J.B.S. Haldane che, benché avessero preso le distanze dall'URSS, erano convinti socialisti. Restava leale nei confronti della patria americana, ma sulle posizioni tipiche del radicalismo libertario, che condivide i valori fondamentali della democrazia americana, stemperandoli in chiave antiaelitaria; lo si potrebbe paragonare forse a studiosi più giovani di lui come Charles Wright-Mills, se non a Noam Chomsky. Inoltre aveva una psicologia fragile, che ne esaltava la sensibilità, facendogli vivere il disagio che vivono coloro che non riescono facilmente ad integrarsi in un ruolo prestabilito.

⁴⁶² Lettera di von Neumann a Strauss, 9 dicembre 1946 (VNLC), in von Neumann (2005, p. 240).

Von Neumann era tradizionalmente anticomunista e teso ad identificarsi con i circoli elitari statunitensi, così ben messi in luce dal sociologo Wright-Mills. Tra i più geniali protagonisti della Cibernetica (penso soprattutto a Wiener e Pitts), era forse quello emotivamente più stabile: dai modi cortesi, “gentleman Johnny”, come usavano chiamarlo i coniugi Wiener, era uomo di mondo, abile organizzatore. Il suo comportamento era composto, scrupoloso nel rispetto delle rigide regole imposte dal “security system” del tempo di guerra e del dopoguerra, e ciò giustifica anche la sua facilità a tacere i fini ultimi delle sue ricerche con tutti coloro che non avevano la “clearance” per conoscerli; ciò valeva con tutti senza eccezione, nei confronti di Wiener, ma pure con Warren Weaver, suo capo all’AMP. Lo stile della sua adesione al progetto Manhattan e poi la sua partecipazione alla Guerra fredda, nel quadro della quale contribuì significativamente, tra le altre cose, al progetto per la bomba H e per i missili intercontinentali Atlas, che sarebbero serviti da vettori per le atomiche, si spiega non tanto con fanatiche inclinazioni belliciste, secondo la caricatura che Stanley Kubrick fece di lui nel film *Dr. Strangelove*. Piuttosto von Neumann stimava la disciplina militare in quanto tale, con uno spirito che Wiener avrebbe probabilmente considerato come “il vecchio cipiglio asburgico” [Wiener 1949d, p. 997]. Sintomatico è il fatto che von Neumann avesse cercato, sebbene senza riuscirci, di svolgere la sua attività per il BRL nella veste di militare; d’altro canto, anche alcuni dei partecipanti al convegno di Princeton erano tali, come il capitano Goldstine e il luogotenente Aiken. I principi di gerarchia e disciplina militari garantivano un maggior rispetto delle norme di segretezza, tanto che a Los Alamos, per esempio, quando si voleva star tranquilli riguardo alle questioni di massima riservatezza, si chiamavano esperti che fossero al contempo anche arruolati nelle forze armate, come accadde nel caso dell’addetto ai calcolatori IBM, o per le squadre di addetti ai calcoli manuali. Von Neumann, perciò, non si comportò altro che come un ligio soldato, sebbene non fosse stato arruolato ufficialmente. Da questo spirito militare discende la sua concezione della responsabilità di fronte alle proprie azioni, a cui il soldato rinuncia con il rimando all’ordine ricevuto dai superiori. Proprio la nozione di “responsabilità” costituisce il concetto cruciale in tutta questa storia. Nel 1948, nell’articolo *A rebellus scientist after two years*, Wiener si impegna così:

«in every case in which my policy can be of any effect, I intend to act on what seems to me to be the most responsible basis on which I can.» [Wiener 1948d, p. 750].

La parola “responsabilità” diviene il filo rosso che collega l’impegno di Wiener fino alla morte. Affermerà nel 1960 di fronte agli accademici sovietici:

«The scholar durst not achieve personal and illimited responsibility, which is all that makes freedom significant. To this needful combination of freedom and responsibility, there is no safe and riskless external guide.» [Wiener 1961b, p. 51].

Von Neumann aveva preso una via sostanzialmente opposta. Racconterà Feynmann che durante la guerra, a Los Alamos, von Neumann gli aveva suggerito questa interessante idea:

«that you don't have to be responsible for the world that you're in. So I have developed a powerful sense of social irresponsibility as a result of von Neumann's advice. It's made me a very happy man ever since. But it was von Neumann who put the seed in that grew into my active irresponsibility!» [Feynman 1985, p. 132]

I cambiamenti di programma di von Neumann

La crisi di Wiener dettò dunque l’agenda della Cibernetica *in fieri*. Nei mesi in cui era maturata la crisi di Wiener, anche l’atteggiamento di von Neumann verso il progetto della “Teleological Society” inevitabilmente cambiò. I primi dubbi sul suo trasferimento all’MIT, non a caso risalgono alle prime avvisaglie della crisi di Wiener. Il 23 agosto 1945, Harrison

dovette perorare la causa dell'assunzione con una lettera indirizzata a von Neumann e per conoscenza a Frank Aydelotte, il rettore dell'IAS. Harrison sottolineava che l'MIT aveva esperienza nella progettazione di calcolatori e che «you would find yourself immersed here in a “potential field” which could only be built up over a long period of time».⁴⁶³ Ma due giorni dopo von Neumann si rivolgeva ad Aydelotte per proporgli il suo progetto di costruire una «all-purpose, automatic, high-speed electronic computing machine»⁴⁶⁴ e il 5 settembre faceva seguire un dettagliato *Memorandum*. Questo progetto non doveva essere dissimile da quello che egli avrebbe voluto presentare all'MIT, e del quale aveva sicuramente discusso anche con Wiener. Le caratteristiche tecniche erano in linea di massima quelle del *First Draft*: una macchina digitale, flessibile, agevolmente riconfigurabile, digitale, binaria, basata su tubi a vuoto, che però dovevano essere in numero minore di quelli dell'ENIAC. Von Neumann ricordava che c'erano allora due progetti simili, l'EDVAC in via di costruzione per il BRL alla Moore School e l'Harvard Mark II per il BuOrd, progetti in cui egli stesso era peraltro coinvolto,⁴⁶⁵ e spiegava che però la nuova macchina avrebbe avuto una differente finalità, in quanto volta a fini prettamente scientifici e perciò richiedente necessariamente di essere realizzata in ambito accademico.

L'IAS ebbe forti esitazioni nell'accettare il progetto, tanto che von Neumann solo nel novembre 1945, quando fu sicuro che l'Istituto aveva dato l'accettazione, inviò le lettere in cui rifiutava le offerte dell'MIT ⁴⁶⁶ ed un'altra che nel frattempo era pervenuta dall'Università di Chicago [cfr. Goldstine 1973, p. 241]. L'IAS era davvero una torre d'avorio, l'istituzione scientifica più pura al mondo e non disponeva delle risorse tecnologiche necessarie per la realizzazione di una grande macchina delle proporzioni dell'ENIAC, l'unico computer che allora esisteva. Si riuscì, però, ad arrangiare un contratto tra tre partner: l'IAS, l'Università di Princeton - istituzione distinta dall'IAS e che possedeva buoni laboratori di fisica - ed infine l'RCA, i cui laboratori si trovavano vicino a Princeton. Il fatto più significativo dell'accordo era che von Neumann, cioè un matematico, ottenne la direzione unica del progetto, che doveva essere realizzato con il supporto degli altri partner ma nella sede dell'IAS, e non commissionato ad una compagnia esterna come l'RCA fornendo agli ingegneri le indicazioni di massima dei matematici, com'era avvenuto nei progetti precedenti, nel caso di Harvard e della Columbia rispetto all'IBM, o nel caso dei BRL rispetto alla Moore School. Per la prima volta la stessa costruzione della macchina non sarebbe stata sotto il controllo dell'ingegnere, ma dello scienziato.

Uno dei problemi principali da risolvere era ovviamente quello dei finanziamenti. Un progetto a scopi scientifici, che desiderava di non essere condizionato dalle esigenze contingenti dei militari, né dalle logiche dell'industria, doveva naturalmente cercare finanziamenti presso le fondazioni. Perciò sul finire del 1945 von Neumann inviò a Weaver un *memorandum* per ottenere un finanziamento dalla Rockefeller Foundation [cfr. Wildes e Lindgren 1986, p. 232].⁴⁶⁷ Weaver sentì come suo solito il parere di Caldwell, che però rispose con un rapporto che demoliva il progetto di von Neumann. È interessante soffermarsi sul documento [cfr. *ivi*]. In primo luogo Caldwell considerava troppo ottimistici i tempi di realizzazione, stimati in due o tre anni; von Neumann, egli sosteneva, evidentemente non conosceva bene né i problemi ingegneristici implicati, né il fatto che i finanziamenti smisurati del tempo di guerra non sarebbero continuati per sempre; e nemmeno aveva presenti i progressi compiuti fino al 1942 all'MIT sulla Rapid Arithmetical Machine. Caldwell inoltre non credeva

⁴⁶³ Lettera di Harrison a von Neumann, 23 agosto 1945 (VNLC). Cito da Aspray 1990, nota 5, p. 267.

⁴⁶⁴ Lettera di von Neumann a Aydelotte, 25 agosto 1945 (VNLC). Cito da Heims (1980, nota 27 p. 469).

⁴⁶⁵ Von Neumann, *Memorandum*, 5 settembre 1945 (VNLC) citato da Aspray (1990, p. 53).

⁴⁶⁶ Lettera di von Neumann a Harrison, 20 novembre 1945 (VNLC), in von Neumann (2005, pp. 138-9).

⁴⁶⁷ Wildes e Lindgren non indicano il giorno preciso in cui fu mandato questo *memorandum*.

che i calcolatori digitali avrebbero soppiantato gli analizzatori differenziali, né quelli a relè. Irrealistica infine era la sede prescelta, l'IAS. Sicuramente migliore sarebbe stato il progetto di computer digitale che l'MIT stesso si apprestava a varare - di cui parleremo più avanti - da realizzare nel Center of Analysis di Caldwell, con l'appoggio dell'RLE e del dipartimento di matematica, e che avrebbe permesso di rispondere a tutte le esigenze di calcolo del dopoguerra richiedenti un ritmo di produzione su scala industriale [cfr. *ivi*].

A parte il conflitto di interessi con il proprio progetto, Caldwell riproponeva la solita mentalità che per tutto il quinquennio bellico aveva bloccato lo sviluppo dei calcolatori elettronici. L'esperienza pregressa sulla Rapid Arithmetical Machine, progetto che ora evidentemente Caldwell si apprestava a disimballare dalla naftalina in cui l'aveva collocato nel 1942, invece che promuovere lo sviluppo del computer moderno, continuava a paralizzare ogni altra iniziativa. Sopravvivevano le lealtà, non del tutto disinteressate, verso gli analizzatori e le macchine digitali elettromeccaniche, ma soprattutto si ragionava nella prospettiva dei centri di calcolo anteguerra, nati per trattare secondo i metodi di produzione su larga scala, carichi crescenti di tavole scientifiche. Caldwell mostrava di ignorare completamente le esigenze poste da Wiener sin dal 1940 nel *Memorandum sulle EDP*, secondo cui il calcolatore digitale elettronico trovava la sua prima ragion d'essere nel risolvere problemi matematici intrattabili senza calcolatori ultraveloci, esigenze che von Neumann aveva ulteriormente compreso come appartenenti ad un vero e proprio nuovo continente matematico, in quanto le nuove macchine avrebbero richiesto nuove teorie numeriche e permesso il sorgere di una "matematica sperimentale", che aiutasse la scoperta di procedure analitiche. Caldwell non considerava nemmeno il punto di vista espresso da molti sull'importanza del calcolatore digitale per il controllo automatico in tempo reale, nell'era della nascente missilistica, per non parlare delle nuove possibilità dell'intelligenza artificiale, sentite più di ogni altro da Alan Turing in Inghilterra.

Il 26 dicembre 1945 Weaver rispondeva a von Neumann tenendosi sul vago e adducendo un sovraccarico di richieste di finanziamenti, proveniente specialmente dai "paesi europei devastati". Dopo un estenuante carteggio, infine, nel marzo 1946, arrivò il no definitivo, assieme ad una vaghissima promessa per il futuro che non si realizzò mai.⁴⁶⁸

La vicenda mostra come a vedere le cose col microscopio certe distinzioni manichee non sono più adatte a rappresentare la realtà. Se dal punto di vista etico Wiener e von Neumann erano su fronti opposti, rispetto al modo di pensare di certi ingegneri come Caldwell, Eckert e Gordon Brown, erano sicuramente dalla stessa parte. Nel corso delle Macy conferences, se uno psicologo o un sociologo, confondendosi, chiamava Wiener "engineer", questi si adirava e per togliere ogni ombra di dubbio sulla propria identità intitolò la propria autobiografia *I am a Mathematician*. L'atteggiamento di Caldwell fornisce la sostanza per comprendere perché nelle opere del dopoguerra Wiener ce l'avesse tanto con gli ingegneri, specialmente con quei devoti della religione del "gadgetterism", che vogliono risolvere tutti i problemi mediante congegni. Per altri versi, c'erano anche ingegneri fatti di una pasta affatto differente, come quel Richard Taylor con cui qualche mese prima von Neumann si era fermato a parlare all'MIT per un paio di giorni e che diverrà un lucido paladino del computer da realizzare in quell'istituto.

Tornando al progetto dello IAS computer, il finanziamento pervenne infine con un complicato accordo tra RCA, Marina, Esercito e Università di Princeton. Curiosamente, un progetto che voleva per principio essere svincolato da governo e industrie, non poté che basarsi sui loro soldi. In questo contesto nacque il rapporto fra von Neumann ed il commodoro Louis L. Strauss, poi tornato allo stato civile per divenire uno dei cinque membri della Atomic

⁴⁶⁸ Seguì un carteggio tra Aydelotte e Weaver e poi ancora tra Weaver e von Neumann, finché il 21 Marzo 1946 non arrivò da Weaver il no definitivo [cfr. Aspray 1990, p. 54 e nota 22 a p. 269].

Energy Commission (AEC), il quale comprese l'importanza della nuova visione computazionale, attraverso i due lunghi *memoranda* che nell'ottobre 1945 von Neumann gli aveva inviato.⁴⁶⁹

Com'era avvenuto per la scelta di finanziare il primo ENIAC, ancora una volta uno degli appoggi principali al progetto dell'IAS computer venne da Oswald Veblen e da altri studiosi vicini al BRL, nonché dai militari. Il progetto dipese amministrativamente da un "comitato per i calcolatori elettronici" presieduto da Aydelotte, di cui facevano anche parte Elmer W. Engstrom, vice-presidente per la ricerche della RCA, Hugh S. Taylor, preside della Graduate School dell'Università di Princeton, Veblen e von Neumann; ma dal punto di vista realizzativo dipese da un comitato di consulenti presieduto da von Neumann, di cui facevano parte John W. Tukey e V. K. Zworykin, poi allargato a G. W. Brown, J. A. Rajchman, A.W. Vance e H. Goldstine. L'ingegnere Burks, il matematico Goldstine e la moglie Adele, la prima programmatrice dell'ENIAC, si trasferirono a Princeton per unirsi al progetto [cfr. Goldstine 1973, pp. 241-4].

Si è ipotizzato che von Neumann abbia usato l'invito dell'MIT essenzialmente come leva per convincere l'IAS. Si tratta di una ipotesi che ho difficoltà a condividere. Certamente la consapevolezza di perdere von Neumann poteva aver messo in movimento le autorità dell'IAS, ma l'MIT doveva apparire la scelta migliore per la costruzione del calcolatore e l'IAS come un salto nel buio agli occhi di tutti, von Neumann compreso. Per altri versi, von Neumann forse aveva avuto già in precedenza qualche sentore dell'aria che tirava, esemplificata dalla linea di Caldwell, ed immaginato che sarebbero potuti sorgere attriti tra il punto di vista dei matematici e quelli degli ingegneri di vecchia scuola all'MIT. Era stata probabilmente soprattutto l'appassionata attività di *lobbying* svolta da Wiener nella prospettiva della "Teleological Society", a portarlo ad un passo dall'accettare l'offerta dell'MIT, e fu di conseguenza la sua crisi di coscienza a farlo desistere. Questa ipotesi è corroborata almeno parzialmente dalla lettera che, quando il progetto del computer fu definitivamente accettato dall'IAS, von Neumann scrisse a Wiener, il 20 novembre 1945. Il tenore della lettera è caldo. Gli illustra nei particolari i miracoli organizzativi che era riuscito a fare, per un computer da costruire all'IAS, da utilizzare esclusivamente come «research tool», con lui come direttore unico di un progetto «of great importance in several vital respects», che naturalmente ora egli sentiva come sua «prime responsibility to see it through here».⁴⁷⁰ Aggiungeva:

«I need not tell you how much I regret that this means that I cannot join you at Tech, especially since I am sure that without the decisive encouragement that I received from you and from the Tech authorities I would have hardly had the perseverance and the strength of conviction which are the minimum requirements in this project. *On the other hand, I hope that we shall work together in the field just the same. I think that we should discuss the modalities as quickly as possible*».⁴⁷¹

Dunque von Neumann voleva continuare a collaborare con Wiener nel "campo senza nome" e lo invitava a raggiungerlo al più presto a Princeton come ospite dell'IAS, visto che dopo qualche giorno sarebbe dovuto partire per Los Alamos (non diceva più "for the West"). Si congedava con un cordiale «hoping to see you soon, and very much looking forward to it, Yours as ever John von Neumann».⁴⁷²

Von Neumann doveva procurarsi un capo ingegnere. Saltata la possibilità di Presper Eckert a causa della lite giudiziaria sorta sulla questione dei brevetti dell'EDVAC, gli fu proposto dal

⁴⁶⁹ Lettera di von Neumann al Commodore Louis L. Strauss, 20 ottobre 1945, in von Neumann (2005, pp. 234-6); Von Neumann al Commodore Lewis L. Strauss 24 ottobre 1945 [*ivi*, pp. 236-9].

⁴⁷⁰ Lettera di von Neumann a Wiener, 20 novembre 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴⁷¹ *Ivi*. Il corsivo è mio.

⁴⁷² *Ivi*.

fisico John Wheeler il nome di Wilcox Overbeck, che aveva lavorato all'MIT Rapid Arithmetical Machine. Il 28 novembre 1945 gli inviava una lettera in cui venivano delineate le principali caratteristiche tecniche del progetto.⁴⁷³ Seguì un carteggio contenente uno scambio di esperienze. Overbeck gli raccontò del precedente lavoro all'MIT e degli speciali tubi 10 in 1 sviluppati per diminuire il numero di valvole necessarie [cfr. Aspray 1990, nota 36, p. 272]. Però non accettò l'invito. Fu così che all'inizio del 1946, Wiener e von Neumann telefonarono insieme da Princeton a Julian Bigelow, per invitarlo a Princeton a prendere il posto di capo ingegnere del progetto [cfr. Wiener 1956, p. 243]. Il 7 marzo 1946 Bigelow accettò la proposta dello IAS, con la promessa che avrebbe lavorato a tempo pieno al progetto, non appena si fosse liberato dai precedenti impegni [cfr. Goldstine 1973, p. 252].

Se pensiamo alle eccezionali difficoltà che incontrarono contemporaneamente i matematici inglesi per realizzare i propri progetti (cfr. il prossimo capitolo), proprio per l'assenza di una stretta collaborazione con gli ingegneri e per tendenza di questi ultimi ad attribuirsi la paternità delle macchine che uscivano dalle loro mani, la squadra di von Neumann fu davvero un *unicum* socio-tecnico che meriterebbe uno studio dettagliato, cosa che qui non abbiamo la possibilità di fare.

Il progetto di ricerca di Rosenblueth, Wiener e Pitts

Nel corso del 1946 Wiener, privo dell'entusiasmo che lo aveva animato nei mesi precedenti il bombardamento atomico del Giappone, ed evidentemente avendo ritirato le dimissioni dall'MIT, riprese interesse per il "campo senza nome". La crisi di coscienza del 1945 era apparentemente superata, anche se il fuoco continuava ad ardere sotto la cenere, per riaccendersi drammaticamente nel dicembre di quell'anno, quando ribadì pubblicamente, sull'*Atlantic Monthly*, con una lettera intitolata "A Scientist Rebels" le sue intenzioni di non prendere più parte a ricerche con finalità militari.

Si mise una pietra sopra il sogno della "Teleological Society" ed al suo posto prevalse un approccio più leggero. Il gruppo riunitosi a Princeton si andò riorganizzando intorno ad almeno due distinti progetti di ricerca. Da un lato quello dell'IAS computer, di cui si è detto, dall'altro un programma di ricerca quinquennale che coinvolgeva Wiener, Rosenblueth e Pitts, per una serie di studi teorico-sperimentali inquadrati esplicitamente come il proseguimento della ricerca sul muscolo cardiaco del 1945, che fu istituzionalizzato con un contratto di ricerca tra MIT e Istituto National de Cardiologia (INC), e finanziato dalla sezione di scienze biologiche, diretta da Robert Morison, amico di Rosenblueth, che conosceva bene anche Wiener, essendo stato uno dei partecipanti del "dinner group" [cfr. Wiener 1956, p. 286]. Walter Pitts, concluso il contratto con la Kellex, aveva ottenuto la Fellowship della Guggenheim Memorial Foundation, per cui si era adoperato Wiener,⁴⁷⁴ e continuò in questa nuova veste ad affiancarlo. Qualche anno dopo avrebbe ottenuto il *Ph.D.* in matematica all'MIT. Pitts restò anche in contatto con McCulloch, il quale per il momento rimase alla Illinois University.

Il contratto si muoveva sulla falsariga della ricerca del 1945 sul muscolo cardiaco, con un interesse prevalentemente focalizzato sulla neurologia. Sarebbe stato caratterizzato dalla realizzazione di modelli matematici raffinati e dettagliati esperimenti neurofisiologici. Gli esperimenti si sarebbero sempre svolti all'INC e, una volta Wiener e Pitts e l'anno successivo Rosenblueth, avrebbero risieduto ad anni alterni, in Messico e negli Stati Uniti [cfr. Wiener 1956, p. 286].

Per il progetto quinquennale la Rockefeller Foundation offrì 27.500 dollari. Il resoconto relativo al progetto che troviamo nell'Annuario della Fondazione per il 1947, usa un

⁴⁷³ Lettera di von Neumann a Overbeck, 28 novembre 1945 (VNLC), in von Neumann (2005, pp. 205-6).

⁴⁷⁴ Lettera di Wiener a Moe, 6 settembre 1945 (WAMIT), Box 4, folder 68. Citata da Piccinini (2003, p. 86).

linguaggio più comune e “laico”, esente dalla impalcatatura concettuale in cui Wiener incastonerà i concetti entro il suo libro, e che perciò ci permette di valutare tali ricerche in relazione a tentativi simili, con la possibilità di coglierne anche gli aspetti differenziali. Nell’Annuario Rockefeller del 1947 il contratto di ricerca era presentato come «a joint research in mathematical biology under Professor Norbert Wiener and Dr. Arturo Rosenblueth» [p. 111], ed era il proseguimento di un «collaborative work begun three years ago», con riferimento alla ricerca del 1945 sul muscolo cardiaco e forse anche a “Behavior, Purpose and Teleology”.⁴⁷⁵ In un altro capitolo, esso è posto accanto ad altre ricerche di “biofisica”, ugualmente finanziate dalla Fondazione, specificando che questa era finalizzata «to continue joint research on the application of mathematical analysis to problems of the central nervous system». ⁴⁷⁶ Si diceva anche che «they are particularly interested in mathematical analyses of activity in the nervous system» [ivi, p. 111]. Si trattava dunque sostanzialmente di studi di biofisica o biomatematica la cui specificità era data dall’interesse per il sistema nervoso, e dall’applicazione congiunta della perizia matematica di Wiener e di quella nella sperimentazione fisiologica di Rosenblueth.

L’MIT Rockefeller Electronic Digital Computer

Il contratto di ricerca di Wiener e Rosenblueth si intrecciava con il progetto poi abbandonato del “Rockefeller Electronic Digital Computer” dell’MIT. Sul finire del 1945 aveva preso piede l’idea, strutturatasi poi nei primi mesi del 1946, della costruzione di un calcolatore digitale elettronico da parte dell’MIT Center of Analysis, in collaborazione con il Research Laboratory of Electronics (RLE) - che sotto la direzione di Julius A. Stratton aveva ereditato le strutture e parte del personale del Radiation Laboratory - e con il Dipartimento di Matematica, di cui l’elemento di spicco era rappresentato da Wiener.

La sezione di ricerche fisiche della Rockefeller Foundation, quella di Weaver, concesse all’MIT un finanziamento di 100.000 dollari [cfr. Wildes e Lindgren 1986, p. 233], cosicché il progetto si inanellò con l’altro contratto di ricerca sottoscritto da Wiener e Rosenblueth con la Fondazione. Anche per questo motivo, probabilmente, nel progetto di computer dell’MIT si attribuiva un ruolo rilevante a Wiener ed alle persone raccolte intorno a lui. Nel promemoria allegato alla domanda di finanziamento, stilato da Stratton e inviato a Warren Weaver nell’aprile 1946 si spiega:

«I believe that the strength of this proposal from MIT rests on the collaboration that may be anticipated between the Department of Mathematics, the Research Laboratory of Electronics, and the Center of Analysis. The interest in mathematics focuses, of course, on Professor Norbert Wiener and his students. Professor Wiener’s current ideas about computing processes, as well as certain physiological analogues that he has studied, are enormously stimulating. The part of the Electronics Laboratories in this program is that of translating such as those of Wiener and his group into physical reality, and supplying an intermediary stage of basic physical research between the purely mathematical concepts and the ultimate specific application to a computing machine in the Center of Analysis» [Wildes e Lindgren 1986, p. 234].

Warren Weaver teneva moltissimo alla collaborazione di Wiener, che stimava innanzitutto per la sua conoscenza dei computer, come dimostra una lettera dell’inizio del 1947 in cui gli si rivolgeva per ottenere un parere sulla possibilità della traduzione automatica e chiudeva la lettera con la domanda: «As a linguist and *expert on computers*, do you think it is worth

⁴⁷⁵ Cfr. *Rockefeller Report 1947*, par. “Massachusetts Institute of Technology. Mathematical Biology”, pp. 111-2; cfr. anche la stessa notizia *ivi*, p. 160.

⁴⁷⁶ *Ivi*, par. “The Cross-Breeding of Biology”, pp. 31-4.

thinking about?».⁴⁷⁷ La collaborazione con Wiener e il suo gruppo è richiamata anche nel Rapporto Annuale della Fondazione per il 1946, che nel dare la notizia del progetto di computer conclude: «Professor Norbert Wiener and others in the Mathematics Department are collaborating on the difficult mathematical aspects of the program».⁴⁷⁸

Tuttavia, mentre Wiener si andava sempre più coinvolgendo nelle ricerche con Rosenblueth, lo stesso non accadde per questo computer, e forse non solo per mancanza di volontà da parte sua. Conosciamo infatti bene lo stile di pensiero prevalente all'MIT rispetto ai calcolatori incarnato da Samuel Caldwell, a cui era affidata la realizzazione del progetto in quanto direttore del Center of Analysis. Anche se non se ne sa nulla di preciso è probabile che egli abbia ritenuto non indispensabile il coinvolgimento di un matematico come Wiener. Questo non era però il parere di Warren Weaver, che quando seppe che Wiener aveva partecipato in maniera scarsa ai primi mesi di lavoro, esprime il proprio sconcerto. In una lettera asseriva:

«I think that the question, 'What does one want a computer to do?' requires great knowledge of mathematics, great imagination, great sweep and depth of mind. One could get some inspiration, doubtless, by talking to a dozen leaders in applied mathematics. But this is where I had hoped and expected we would have the genius of Norbert Wiener» [Wildes e Lindgren 1986, pp. 234-5].

Che Warren Weaver, cioè colui che era stato il capo di Wiener per tutto il quinquennio bellico, si esprimesse così è il migliore riconoscimento dell'importante ruolo che gli attribuiva riguardo alle ricerche sui calcolatori digitali. Sta di fatto che Wiener per tutto il 1946 partecipò sporadicamente alle riunioni sul computer, il progetto per il quale peraltro procedeva stancamente.

Va detto che Caldwell non rappresentava l'unica linea di pensiero in questo ambito all'MIT. Del Center of Analysis si occupava anche Richard Taylor, l'ingegnere incontrato da von Neumann nell'aprile 1945, che del Center era stato supervisore *ad interim*, quando Caldwell aveva assunto un ruolo direttivo nella Divisione 7 [cfr. Owens 1986, p. 81]. Taylor si appassionò al progetto del Rockefeller Electronic Computer, e da alcuni suoi rapporti, risalenti ai mesi a cavallo tra 1946 e 1947, emerge un modo di pensare ben diverso da quello di Caldwell. In un rapporto egli prende le distanze dall'analizzatore differenziale, di cui mette in luce la scarsa precisione e, con un argomento che sembra tratto dal *Memorandum sulle EDP*, sottolinea come l'«inerzia meccanica» dei suoi elementi ponga un limite insuperabile alla velocità,⁴⁷⁹ in un altro, ragionando in maniera affine a von Neumann, considera il calcolatore elettronico non tanto come una macchina per risolvere su larga scala problemi di *routine*, ma come uno strumento per una vera e propria sperimentazione nelle mani del matematico applicato; ed indica come si tratti di studiare metodi numerici nuovi espressamente creati per i calcolatori elettronici, diversi rispetto a quelli tradizionali adatti al calcolo manuale.⁴⁸⁰

Wiener non era il tipo d'uomo in grado di organizzare tutti i fattori tecnici e umani per dare un impulso al progetto dal punto di vista di Taylor, che era lo stesso di von Neumann. Non aveva la personalità, ma nemmeno la voglia di cimentarsi in questa che era sempre di meno la sua guerra (in tutti i sensi). All'inizio del giugno 1947 Caldwell registrò una caduta del morale tra gli uomini del suo progetto e prospettò la possibilità di riversare tutte le energie dell'MIT su un altro progetto di computer che nel frattempo aveva preso quota, il Whirlwind avviato da Forrester al Servo Lab [cfr. Wildes e Lindgren 1986, p. 235]. Il 25 giugno 1947 il rettore

⁴⁷⁷ La lettera è riportata in Warren Weaver, "Translation", 15 luglio 1949, pubblicata a sua volta da Locke e Booth (1955 pp.15-23, il corsivo è mio).

⁴⁷⁸ *Rockefeller Report 1946*, par. "Massachusetts Institute of Technology Electronic Computation", p. 169.

⁴⁷⁹ Cfr. Richard Taylor, "Memorandum, Electronic Calculating Machine, 4/9/46," in RF1.1/224/4/31; cfr. Weaver, "Diaries", 11 Aprile 1946, citato da Owens (1986, p. 83).

⁴⁸⁰ Cfr. Richard Taylor, "Progress report," 8 febbraio 1947, citato da Wildes e Lindgren (1986, p. 234).

Compton scrisse a Weaver che l'MIT avrebbe chiuso il progetto, restituito i 100.000 dollari alla Fondazione e concentrato i propri sforzi sul solo Navy Whirlwind project [cfr. *ivi*].

Le Macy Conferences on Cybernetics

I luoghi entro i quali, nel dopoguerra, proseguirono gli scambi di opinioni scientifiche sulla Cibernetica in fieri furono vari e possibilmente più liberi, sebbene le procedure di segretezza introdotte dalla guerra non furono del tutto abolite, nel clima della Guerra Fredda, il cui primo atto a giudizio di molti storici era stato proprio il bombardamento atomico del Giappone, che aveva chiuso la guerra ed era stato una manifestazione di superiorità militare verso l'URSS, appena sceso in guerra contro il Giappone stesso. Vi furono diversi congressi negli Stati Uniti e altrove. La principale agorà della Cibernetica fu costituita comunque dalle "Macy Conferences on Cybernetics", che al posto della sognata "Teleological Society" costituirono un filo rosso per tenere garantire il dialogo e lo scambio dei risultati che emergevano dal lavoro a Princeton e quello tra Città del Messico e l'MIT. Lo stesso annuario del 1947 della Rockefeller Foundation, riferendo del progetto del gruppo di Wiener e Rosenblueth, ne dà notizia. Leggiamo:

«Both Dr. Wiener and Dr. Rosenblueth are leaders in an active group of investigators representing mathematics and biology, as well as related fields such as psychiatry, cultural anthropology and sociology. Under the auspices of the Macy Foundation the group meets semiannually to discuss ways and means of applying recent mathematical discoveries to biological and social problems» [*Rockefeller Report 1947*, pp. 111-2].

La Macy Foundation era la stessa che aveva patrocinato il convegno dell'aprile 1942 sulla "Cerebral inhibition" dove Rosenblueth aveva riassunto i risultati che poi sarebbero confluiti in "Behavior Purpose and Teleology", soffermandosi in particolare sul concetto di *feedback* negativo, come meccanismo per il controllo del comportamento intenzionale. Questo discorso aveva lasciato una forte impressione sui partecipanti. Chi si è occupato di queste vicende ricorda generalmente l'episodio secondo cui l'antropologa Margaret Mead fu talmente entusiasta, che non si accorse di essersi rotta un dente se non alla fine dell'incontro.⁴⁸¹ Lo stesso Frank Fremont-Smith, presidente della Fondazione, era rimasto molto colpito dall'esposizione di Rosenblueth. Scrive infatti McCulloch a Rosenblueth il 14 febbraio 1946:

«You know, of course, that it was your remark some years ago at a Macy gathering that implanted the *feedback* explanation of purposive acts in Frank's mind. I have done what I could to nurture that seed. Today it grows like a weed and gets cross-fertilized».⁴⁸²

Dal 1942 McCulloch era restato in stretto contatto con la Fondazione Macy, tenendo al corrente Fremont-Smith sugli sviluppi nel "nuovo campo". Nell'agosto del 1944 lo informava delle ricerche avviate da Wiener e Pitts, scrivendogli:

«I am still of the opinion that the group which is forming around Pitts and Wiener [...] stands a better chance of contributing to breeching the woeful breeches between physiology and psychology and physiology and sociology than any lone worker anywhere. Nevertheless, I am plowing ahead on theory, usually at night, and I believe I have just begun to see the light with respect to the origin of hypotheses which may be wrong even though the nervous system enunciates no false propositions. I will try it out on Rashevsky's gang».⁴⁸³

La serie di incontri Macy sulla Cibernetica si andò strutturando *in progress*. Inizialmente fu fissato, come occasione *una tantum*, un convegno il 17 e 18 marzo 1946, avente per oggetto la

⁴⁸¹ Cfr. Mead (1968, p. 1), cito da Heims (1991, it. p. 18).

⁴⁸² Lettera di McCulloch a Rosenblueth, 14 febbraio 1946 (MCAPS). Cito da Hellman (1981, p. 235 nota 21).

⁴⁸³ Lettera di McCulloch a Fremont-Smith, 27 agosto 1945 (MCAPS) folder "Fremont-Smith". Cito da Piccinini (2003, p. 85).

nozione di *feedback* negativo. Poi si decise di farne il primo di una serie di incontri periodici, sempre costituiti da due intense giornate, che si tennero con cadenza semestrale fino al 1948, e dopo di allora solo annualmente, fino al 1953. Furono complessivamente dieci e diverranno noti come “Macy Conferences on Cybernetics”, dopo la pubblicazione di *Cybernetics* di Wiener nel 1948, libro con il quale fu finalmente battezzato il “campo senza nome”. Di questi incontri, che ebbero tutti McCulloch come “chairman”, solo dal 6° incontro al 10° si prepararono dei regolari *Proceedings*, ai quali, con riferimento al libro di Wiener, fu dato il titolo di *Cybernetics*. Dei primi 5 incontri si possiedono solo alcuni riassunti, il più dettagliato dei quali è un rapporto di McCulloch, che riassume i primi tre incontri, a cui faremo riferimento come al *McCulloch's Summary*.

Come ha ampiamente dimostrato Steve J. Heims (1990), autore di un'importante monografia su questi incontri, principalmente focalizzata sul ruolo svolto dalle scienze socio-umane, l'uditorio delle Macy Conferences era costituito da due nuclei distinti di studiosi. C'era un nucleo proveniente principalmente dalle scienze socio-umane che, come ha chiarito Heims, afferivano da tempo alla Macy Foundation, la quale costituiva un loro riferimento non solo organizzativo ma anche teorico, caratterizzato da convinzioni olistico-relazionali. Lawrence Frank, dirigente della Macy, e gli antropologi Margaret Mead e Gregory Bateson formavano un trio affiatato, che era anche in stretti rapporti con Kurt Lewin, dell'MIT, considerato il padre della psicologia sociale americana. Possiamo citare ancora Lawrence Kubie, ex neurofisiologo divenuto psicanalista; Heinrich Klüver e Molly Harrower, psicologi sperimentali. Questo nucleo condivideva concezioni organicistiche, olistiche, relazionali [Heims 1990, tr. it. 188], un filone intellettuale che aveva profonde radici negli Stati Uniti della prima metà del Novecento ed era particolarmente vivo nella scuola psicologica e sociologica di Chicago, dominata dalla gnoseologia antiatomistica di John Dewey (1896), dall'interazionismo simbolico di George Herbert Mead, dall'ecologia urbana di sociologi come Robert Park, William Thomas e altri [cfr. Bulmer 1984]. L'antiatomismo psicologico e sociologico rifiutava di considerare l'individuo come un atomo sociale precostituito a prescindere dall'interazione con gli altri; al contrario, l'individuo veniva a costituirsi come tale nella stessa interazione sociale, cosicché una modificazione delle forme dell'interazione avrebbe comportato un cambiamento degli individui stessi, ed una modificazione dell'individuo il riaggiustamento dell'intera rete di interazioni tra individui. Così per lo psicologo G. H. Mead, il “sé”, cioè l'immagine che l'individuo ha di se stesso, si costituisce specchiandosi nell'idea che gli altri hanno di lui; per Sullivan, la malattia psichica non è un solo un fatto individuale, ma dipende dalle relazioni familiari [cfr. Greenberg e Mitchell 1983, it. pp. 91-114]. La Macy aveva favorito l'incontro tra la psichiatria di Sullivan e l'antropologia culturale di Edward Sapir [cfr. Sullivan 1964], da cui era scaturito il movimento “Personalità e Cultura” - a cui faceva riferimento Margaret Mead - che studiava la personalità entro la cultura della popolazione in cui si costituisce [cfr. Heims 1991, it. pp. 80-1]. Queste idee trovavano consonanze in Europa nella psicologia della Gestalt, principalmente dedicata alla percezione, in cui le istanze sistemiche era fortemente sentite; e nell'antropologia culturale di Bronislaw K. Malinowski e di Alfred R. Radcliffe-Brown, alla cui scuola si era formato Gregory Bateson [cfr. Montagnini 2007].

Tali correnti teoriche avevano sempre sentito da Dewey in poi l'urgenza di congiungere ricerca e intervento sociopsicologico, il quale venne inteso come psicoterapia familiare, politica e sociale, per prefigurarsi come ingegneria sociale [cfr. Madge 1962]. Si spiega così la partecipazione di alcuni dei membri afferenti al gruppo Macy (Sullivan, Margaret Mead, Lawrence Frank) al movimento per la “Mental Health”, che organizzò nel 1948 la conferenza mondiale di Londra sulla “Mental Hygiene”, dove si sostenne che «l'obiettivo della salute

mentale si è ampliato verso lo sviluppo di personalità sane, nel tentativo di creare una società sana» [Flugel et al. 1948; citato da Heims 1991, p. 198]. Un'altra caratteristica di questa corrente era l'esigenza di una stretta collaborazione con le scienze matematico-naturali, cercata specialmente sul versante sistemico-relazionale, al fine di rendere rigorosa la teoria sociale. In passato questo aveva condotto all'incontro con l'eminente fisiologo Cannon e con la sua idea di "omeostasi". Si spiega così il fatto di trovare dei fisiologi accanto a psicologi e scienziati sociali, nonché la presenza di George E. Hutchinson, uno dei padri fondatori dell'ecologia, in quanto scienza che studia la biosfera come sistema autoregolantesi [cfr. Grinevald 1992] e, naturalmente, si comprende anche il fascino che esercitò su di essi la nozione di "feedback", nonché il lavoro sul comportamento teleologico di Wiener e Rosenblueth.

Accanto a questo nucleo di persone sedettero alcuni dei principali partecipanti al Convegno di Princeton del gennaio 1945. In particolare, i tre matematici Wiener, von Neumann e Pitts; il neuroanatomista Lorente de Nó, lo psichiatra McCulloch e il neurofisiologo Rosenblueth. A partire dal secondo incontro si sarebbe aggregato anche Julian Bigelow. Sebbene non presenti al Convegno di Princeton, possono essere inseriti in questo nucleo anche persone vicine a McCulloch, come i neuroanatomisti Ralf Gerard e von Bonin, e il filosofo F. S. C. Northrop; come pure l'economista Oskar Morgenstern, che durante la guerra aveva collaborato con von Neumann all'applicazione della teoria dei giochi all'economia [cfr. von Neumann e Morgenstern 1944], e l'econometrico e statistico Leonard J. Savage, i quali potrebbero essere considerati come rappresentanti del gruppo "2" del Convegno di Princeton; ad essi può essere associato anche Paul Lazarsfeld, il maggiore sostenitore dell'uso dei metodi quantitativi in sociologia, desideroso di applicare la teoria della previsione di Wiener alle fenomenologie sociali.

Il nucleo di Princeton, più eterogeneo dal punto di vista ideologico, era unito soprattutto dalla condivisione dei primi progetti cibernetici, quelli riguardanti il computer con il parallelo nel cervello e quelli riguardanti il sistema nervoso studiato con i metodi della "ingegneria delle comunicazioni" generalizzata di Wiener, nonché le applicazioni di essa all'economia e alle scienze sociali in generale.

Mettere insieme i due nuclei di studiosi introdusse nella Cibernetica *in fieri* ulteriori fonti di fraintendimento, rese maggiormente acute dalla carenza di conoscenze matematiche che caratterizzava il "nucleo olistico", e da una certa allergia verso le idee olistiche che caratterizzava il nucleo di Princeton, che tendeva a considerarle vaghe e non particolarmente rilevanti. In ogni caso il fraintendimento iniziò sin dallo scopo degli incontri. Scrive Wiener nell'autobiografia:

«When I returned to the States [dal Messico] I found that the interest in the sort of work that Arturo and I had been doing together, namely the application of modern mathematical techniques to the study of the nervous system as a problem in communication, had excited a spirited interest. A colleague of mine had persuaded the Macy Foundation, in New York, to organize a number of meetings devoted to this subject» [Wiener 1956, p. 285].

Il "collega" di cui si parla è qui quasi sicuramente l'allora divenuto "innominabile" McCulloch a causa di screzi mai completamente chiariti sorti intorno al 1950. Antecedentemente al primo incontro, il 5 febbraio 1946, Wiener gli aveva scritto:

«This meeting is going to be a big thing for us and our cause. I am now down with von Neumann discussing plans and I can assure you that his part and mine will be well coordinated. Pitts and I are also getting busy together and so is Rosenblueth. [...] Meanwhile, we are impatient for the meeting of the Macy Foundation and when we shall see you and talk over many things of

common interest. I am very much pleased with the tentative program and I am delighted that you are chairman».⁴⁸⁴

Dunque per Wiener le Macy Conferences rappresentavano l'occasione per continuare a lavorare nel "campo senza nome". Ma l'entusiasmo del "nucleo olistico" non riguardava affatto le ricerche neurofisiologiche sperimentali di Wiener e Rosenblueth, in quanto "applicazione delle moderne tecniche matematiche allo studio del sistema nervoso come un problema di ingegneria delle comunicazioni". Lo "*spirited interest*" era suscitato principalmente dalle idee contenute in Behavior, Purpose and Teleology, e soprattutto dalla nozione di "*feedback*", che entrava in risonanza con le corde profonde delle loro convinzioni olistico-relazionali. Emblematica è in tal senso la posizione di Gregory Bateson, che racconterà:

«In 1942, at a Macy Foundation conference, I met Warren McCulloch and Julian Bigelow, who were then talking excitedly about "*feedback*". The writing of *Naven* had brought me to the very edge of what later became cybernetics, but I lacked the concept of negative *feedback*. When I returned from overseas after the war, I went to Frank Fremont-Smith of the Macy Foundation to ask for a conference on this then-mysterious matter [the *feedback*]. Frank said that he had just arranged such a conference with McCulloch as chairman. It thus happened that I was privileged to be a member of the famous Macy Conferences on Cybernetics» [Bateson 1972, p. X].

Bateson cercava di dotare l'antropologia e le scienze sociali in genere di una solida fondazione teorica, insieme rigorosamente matematica ed olistica dal punto di vista filosofico [cfr. Lipset 1982, p. 143]. Questo era stato anche lo scopo della Macy stessa. In una lettera dell'8 febbraio 1946 di Fremont-Smith a McCulloch si presentano così le finalità dell'incontro del 17 e 18 marzo come un modo per presentare gli sviluppi più recenti in matematica e in ingegneria, per quanto riguardava specialmente i calcolatori e i dispositivi che ricercano la mèta, i quali, nella prospettiva degli avanzamenti in neurofisiologia, promettevano di chiarire i meccanismi soggiacenti al comportamento autocorrettivo e intenzionale di individui e gruppi, un tema che poteva interessare psicologi, psichiatri, antropologi e sociologi.⁴⁸⁵

Come tema del primo incontro Fremont-Smith propose "*Feedback mechanisms and circular causal systems in biology and the social sciences*". Esso fu ripreso nel sottotitolo degli atti ufficiali - pubblicati solo dal 6° incontro in poi - premettendolo al titolo del libro di Wiener: *Cybernetics. Circular causal, and feedback mechanisms in biological and social systems* [cfr. Macy 6 - 10].⁴⁸⁶ Ne risulta un titolo complessivo sostanzialmente diverso da quello del libro di Wiener: *Cybernetics. Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, che corrisponde certamente meglio all'impostazione data dai membri del nucleo di Princeton, in primo luogo Wiener e da von Neumann, al nuovo campo.

Sin dal primo incontro, comunque, fu quest'ultimo punto di vista a prevalere. I due nuclei trovarono un terreno di incontro nel ragionare sul cervello, ambito sul quale potevano dire delle cose neurofisiologi, psichiatri e psicologi. Le esigenze più strettamente sociologiche furono invece messe da parte. Nel corso degli incontri seguirono incomprensioni ed una lenta negoziazione di significati. Alla fine alcuni psicologi e scienziati sociali compresero l'importanza e la novità dell'impostazione proposta dal nucleo di Princeton. Studiosi come Bateson tesero ad integrare creativamente le idee informazioniste con le proprie profonde convinzioni olistiche e ne scaturì l'approccio che caratterizza il Bateson successivo alle Macy Conferences [cfr. Montagnini 2007]. Altri, come Lazarsfeld, preferirono invece desistere,

⁴⁸⁴ Wiener a McCulloch, 5 febbraio 1946 (WAMIT), cito da Heims (1980, p. 203).

⁴⁸⁵ Cfr. Lettera di Fremont-Smith a McCulloch, 8 febbraio 1946, in (MCAPS), citata da Segal (2003, p. 188).

⁴⁸⁶ Le circostanze in cui nel corso del 6° incontro si decise di utilizzare la parola *Cybernetics* come titolo degli atti ufficiali sono state raccontate da von Förster (1991, p. 121).

anche di fronte all'intransigenza di Wiener ad ammettere la possibilità di utilizzare le idee della Cibernetica nella teoria sociale [cfr. Montagnini 2000-2001]. Abbandonarono anche altri studiosi molto legati all'approccio olistico.⁴⁸⁷ Lo spartiacque fu costituito dalla pubblicazione del libro di Wiener nel 1948, che finalmente dava un nome al nuovo campo e cercava di fissarne la fisionomia ed i concetti fondamentali della Cibernetica. Questo snodo è chiarito nel "Summary of the points of agreement reached in the previous nine conferences on cybernetics", distribuito ai partecipanti al decimo e ultimo incontro,⁴⁸⁸ dove McCulloch ricorda:

«Our meetings began chiefly because Norbert Wiener and his friends in mathematics, communication engineering, and physiology, had shown the applicability of the notions of inverse *feedback* to all problems of regulation, homeostasis, and goal-directed activity from steam engines to human societies.

[...] At the end of the first five sessions, of which there are no published transactions, we elected to meet but once a year, keeping our group together as nearly as possible, replacing a few who were lost to us, and inviting a few speakers to help us where help was needed most.

By the time we made this change, we had already discovered that what was crucial in all problems of negative feedback in any servo system was not the energy returned but the information about the outcome of the action to date.

Our theme shifted slowly and inevitably to a field where Norbert Wiener and his friends still were the presiding genii. It became clear that every signal had two aspects: one physical, the other mental, formal, or logical. This turned our attention to computing machinery, to the storage of information as negative entropy. Here belong questions of coding, of languages and their structures, of how they are learned and how they are understood [...].⁴⁸⁹

In seguito, indubbiamente, anche alcuni membri del nucleo di Princeton furono a loro volta influenzati dal clima di pensiero olistico. Ciò si vede ad esempio in uno dei due capitoli aggiunti da Wiener alla seconda edizione di *Cybernetics*, in cui si studiano i fenomeni cooperativi, in particolare soffermandosi sulla tendenza dei sistemi ritmici, come le onde cerebrali, ad accordarsi tra di loro secondo rapporti definiti.

⁴⁸⁷ Heims (1991) sulla base di molte interviste, per esempio con la psicologa Molly Harrower, ha potuto gettare una luce importante sui primi cinque incontri e sulla vicenda dell'abbandono, su cui ebbe un rilevante peso anche il trattamento "irriverente" a cui fu sottoposto Wolfgang Köler.

⁴⁸⁸ Warren S. McCulloch, *Appendix I: Summary of the points of agreement reached in the previous nine conferences on Cybernetics*. Dispensa riassuntiva distribuita ai partecipanti all'inizio della Tenth Conference on Cybernetics in [Macy 10], pp. 69-80.

⁴⁸⁹ *Ivi*, p. 70.

Capitolo 10 – Le riflessioni teoriche della Prima Cibernetica

Computer e cervelli come macchine universali di Turing

Rinviando il lettore ad altri lavori di chi scrive e di altri in cui si indagano le idee delle scienze socio-umane alle Macy Conferences, vorrei soffermarmi qui essenzialmente sulle riflessioni che in quella sede, ed in altre parallele, riguardarono la “scienza senza nome” come la intendeva il nucleo di Princeton.

In questo senso ci interessano soprattutto le discussioni svoltesi il primo giorno del primo incontro Macy, il 17 marzo 1946. La mattina von Neumann parlò delle macchine di calcolo, con una serie di interruzioni da parte di Wiener che sembrerebbero essere state concordate. Discusse della differenza tra «digital machines» e «analogical mechanisms», indicando le prime come calcolatrici numeriche classiche, normalmente binarie, mentre i secondi trattavano i numeri «continuously by magnitudes of length, force, voltage», ecc. La superiorità delle prime nasceva essenzialmente dal fatto che rendevano possibile «to extend their precision indefinitely by the addition of like components» [McCulloch's Summary, p. 1].

Si assiste qui ad un notevole cambiamento di prospettiva rispetto all'anno precedente, in quanto il calcolatore non è più definito solo dalla velocità come “*high speed computing machine*”, ma dal fatto che «such devices could compute any computable number or solve any logical problem presented to them in their own language provided it had a solution» [ivi]. In sostanza – anche se Turing non veniva citato – tali macchine erano ora viste come macchine universali di Turing, limitate in teoria solo dal non poter risolvere problemi non computabili.

Era la prima volta - per quanto mi risulta - che nei discorsi di von Neumann appariva questa caratterizzazione del computer tramite la macchina universale di Turing. In precedenza egli aveva sempre parlato di macchine più o meno “elastiche”, sufficientemente versatili. Wiener in quest'occasione appare in sintonia con von Neumann, tanto che McCulloch parla di una sorta di «contrapuntal theme» di Wiener al discorso di von Neumann, nel sostenere che

«if such a device were set to solve any of the Russellian paradoxes it ought to go into a series of operations instead of coming to a conclusion, so that if it first decided that something was true it would next decide that it was false and vice versa» [ivi].

Qui Wiener indicava un aspetto diverso da quello messo in luce da von Neumann: a suo parere il computer era sì una macchina di Turing universale, ma che non viveva in un universo logico astratto, bensì nel tempo, secondo una sua convinzione asserita circa il modo di lavorare del cervello umano già in “The rôle of the observer”, in cui aveva asserito che «The act of explanation and of the development of concepts actually consumes a certain minimum of time» [Wiener 1936, p. 95]. Nel contrappunto a von Neumann, Wiener riprende questo concetto: una macchina logica come il computer, allo stesso modo del cervello, vive nel tempo, ed in questa situazione, di fronte ad una domanda paradossale del tipo “Epimenide noto mentitore, dice di mentire: dunque mente o dice la verità?”, la macchina logica non risponderebbe “impossibile!”, ma continuerebbe a girare rispondendo “sì, no, sì, no ...” senza pervenire ad una risposta conclusiva. Un discorso che Wiener riprenderà in *Cybernetics*:

«a logical machine [...] may go on grinding through different stages without ever coming to a stop, either by describing a pattern of activity of continually increasing complexity, or by going into a repetitive process like the end of a chess game in which there is a continuing cycle of perpetual check. This occurs in the case of some of the paradoxes of Cantor and Russell. Let us consider the class of all classes which are not members of themselves. [...] In this class a member

of itself? [...] A machine to answer this question would give the successive temporary answers: "yes," "no," "yes," "no," and so on, and would never come to equilibrium» [Wiener 1948, p. 126].

Sempre in *Cybernetics*, Wiener sostiene che tale temporalizzazione ha il potere di far uscire dai paradossi introducendo in qualche modo una parametrizzazione come Russell ha fatto introducendo la teoria dei tipi logici. Von Neumann condividerà in pieno questo ragionamento:

«There is one important difference between ordinary logic and the automata which represent it. Time never occurs in logic, but every network or nervous system has a definite time lag between the input signal and the output response. A definite temporal sequence is always inherent in the operation of such a real system. This is not entirely a disadvantage. For example, it prevents the occurrence of various kinds of more or less overt vicious circles (related to “non-constructivity”, “impredicativity”, and the like) which represent a major class of dangers in modern logical systems» [Von Neumann 1956, p. 44].

Si tratta di un punto di vista su cui entrambi concordavano pienamente: una teoria di queste macchine non potrà essere una teoria meramente logica, proprio perché esse vivono nel tempo, sono soggette ad errori, sono reali.

Von Neumann, ed evidentemente anche Wiener (e ovviamente Pitts), erano giunti alla tesi dell'equivalenza tra computer e macchina universale di Turing universali passando per la teoria delle reti neurali di McCulloch e Pitts.⁴⁹⁰ Il percorso mentale doveva essere stato più o meno questo: si assume la definizione di Macchina di Turing Universale di “On computable Numbers”; si prosegue con la dimostrazione che si trova in “A Logical Calculus” secondo cui può esistere una rete neuronale per ogni possibile macchina di Turing (ammesso in entrambi i casi un nastro infinito riscrivibile); ed infine si considera, secondo quanto sostiene Wiener sulla scorta dell'algebra dei relè, che ogni rete di McCulloch e Pitts può essere realizzata oltre che mediante neuroni, anche mediante relè o elementi relè-equivalenti come triodi, flip flop, ecc.

Vorrei far osservare per inciso che, ad essere precisi, “A Logical Calculus” non dimostra affatto che un cervello è una macchina universale di Turing (nemmeno nell'ipotesi che abbia a disposizione un nastro infinito riscrivibile), ma soltanto che *potrebbe essere* una macchina universale di Turing. Questo perché nell'articolo di McCulloch e Pitts si dimostra solo che ogni possibile specifica macchina di Turing può essere realizzata da una specifica rete neuronale. È indubbiamente vero che «what is possible in mathematics is legitimate»,⁴⁹¹ come rispose seccamente il giovane Wiener a Bertrand Russell che gli aveva obiettato di non ritenere che «a relation ought to be regarded as a set of ordered couples». Tuttavia ciò non è sufficiente a renderlo reale nel senso fisico del termine: ammettere il contrario ci condurrebbe in una situazione peggiore di quella a cui ci porta l'argomento ontologico di Sant'Anselmo.⁴⁹²

Nella conferenza del 1946 von Neumann passava poi a discutere delle memorie [*memory*] nel calcolatore digitale, distinguendone due tipi: quelle costituite da circuiti riverberanti [*reverberating*] e quelle costituite da condensatori verticali. Si trattava in entrambi i casi di memorie veloci e «transitorie». Von Neumann parlò anche della possibilità di introdurre nelle

⁴⁹⁰ Abbiamo già discusso di tale dimostrazione, che si ritrova in numerose pagine di von Neumann. In particolare la conferenza “Rigorous theories of control and information” tenuta nel dicembre 1949 e pubblicata in von Neumann (1966). Altre fonti sulla teoria degli automi di von Neumann “The General and Logical Theory of Automata,” conferenza tenuta allo Hixon Symposium nel settembre 1948 [von Neumann 1951]; “Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components.” Conferenza tenuta al California Institute of Technology nel gennaio 1952 e pubblicato in von Neumann (1956); infine il libro “The Computer and the Brain”, scritto tra il 1955 e il 1956 e pubblicato postumo nel 1958 [von Neumann 1958].

⁴⁹¹ Lettera di Wiener a Russell (WAMIT), cito da Masani (1990, p. 55).

⁴⁹² Sant'Anselmo, come noto, dalla mera pensabilità e dunque dalla mera possibilità di un essere perfetto, fa discendere la sua esistenza come attributo essenziale. Ma se si vuol far passare dalla possibilità alla realtà il cervello costituito dalle reti neurali di McCulloch e Pitts ci si trova in una situazione peggiore in quanto, in questo caso, nemmeno si può invocare la perfezione dell'Essere divino.

memorie sia dati che istruzioni, e del fatto che anche le istruzioni potevano essere il risultato di precedenti elaborazioni. Esistevano inoltre memorie esterne, più lente, ciò che nel *First draft* era stato definito “supporto *R*,” relative alle registrazioni durevoli esterne. Aggiunse che le memorie transitorie non sono «transitory and incommunicable to man, whereas the effectors of such machines might make enduring records in magnetic tapes, punch cards, etc» [*McCulloch's Summary*, p. 1]. Anche rispetto a questo punto Wiener intervenne spiegando che occorreva tener conto del problema «of matching fast machine to slow man, both at the output and the input» [ivi]. E proprio sulle memorie registrate [“*recorded memory*”], la presentazione si concluse - secondo le parole di McCulloch - con un vero e proprio “*duet*” di von Neumann e Wiener. Che il “duetto” si sia soffermato su questi aspetti conforta l’ipotesi proposta nel capitolo ottavo, secondo cui il punto tanto enfatizzato nel *First draft* sulla necessità che la comunicazione con l’unità centrale avvenisse tra *R* e *M* e non tra *R* e le unità di calcolo fosse stato oggetto di parte del rapporto che l’anno precedente Wiener e Pitts si erano impegnati a redigere.

Seguì la relazione di Lorente de Nó sulle «properties of neurons as relays in the computing machine of the nervous system». Si soffermò sull’addizione di latenza, sulla refrattarietà e sul ritardo sinaptico. Si trattava di un discorso da neuro-anatomista, basato su esperimenti. De Nó sottolineò come i preparati sperimentali potevano non rappresentare in maniera esatta le proprietà loro ascritte, in particolare il comportamento “tutto o niente” e i tempi che erano stati misurati [cfr. *McCulloch's Summary*].

La successiva discussione si incentrò essenzialmente sulle caratteristiche del sistema nervoso umano. In particolare interessava molto la questione dei circuiti riverberanti nel cervello. In proposito Frederick Bremer richiamò suoi esperimenti indicanti che «the strychninized nervous system tended to beat in unison throughout even after transection of the spinal cord, provided the fragments were approximated and happened to have natural periods much alike»; Gerard riportò i risultati di alcuni esperimenti sui lobi olfattivi delle rane che, a suo parere, come anche il precedente discorso di Bremer, potevano essere visti come indizio della «importance of field properties in the central nervous system». Gerard fu criticato, come accadrà spesso in questi incontri, in quanto da tali proprietà di campo si riteneva poteva discendere solo una perdita di gradi di libertà «of systems composed of discrete units without any apparent gain in handling information» [ivi, p. 2].

Secondo la breve, ma già radicata tradizione dei cibernetici, la “vibrazione all’unisono” di Bremer poteva essere bene vista come un esempio dei fenomeni riverberanti nel cervello, ricollegabili alle linee di ritardo in uso nell’ENIAC e nell’EDVAC, e ai teoremi sui circuiti neuronali chiusi introdotti da McCulloch e Pitts, da inquadrare come un tipo di memoria transitoria. Fin qui il discorso di Bremer poteva essere condiviso dai cibernetici della prima ora; ma l’enfasi di Gerard sulle «proprietà di campo» introduceva un modo di vedere diverso, basato su una prospettiva olistico-relazionale, che molti rifiutavano.

Il discorso di Wiener e Rosenblueth sul feedback

Tornando all’incontro Macy del marzo 1946, seguì nel pomeriggio la relazione di Wiener e Rosenblueth, che era dedicato ai «goal-seeking devices». Wiener fece una carrellata storica sui controlli automatici dall’epoca di Erone fino alle macchine a vapore, nelle quali erano stati introdotti sia il *feedback* positivo o rigenerativo, sia il *feedback* negativo, anche detto degenerativo o inverso. McCulloch nel riassumere il discorso dà una rappresentazione che ci appare un po’ singolare. Dice che, secondo Wiener, il «regenerative feedback kept the machine oscillating and turning», mentre il «negative feedback kept this at constant frequency or speed regardless of change of head or load» [ivi, p. 2]. Come abbiamo dettagliatamente visto nel

primo capitolo, l'instabilità non è una nozione necessariamente associabile al *feedback* positivo, e non è nemmeno vero che essa sia necessariamente associabile a quello negativo. Come già abbiamo detto commentando "Behavior, purpose and teleology", il problema a mio avviso nasce dal fatto che qui si stava parlando di questioni teoriche ancora nuove e ad uno stato ancora fluido, cosa che lo stesso Wiener verrà chiarendosi solo dopo aver letto il volume di MacColl (1945). Nonostante ciò, nasce qui l'idea, dura a morire tra i cibernetici della prima ora, specialmente tra i non esperti di controlli automatici, secondo cui il *feedback* negativo sia in sé "buono" e sempre stabilizzante, e quello positivo in sé "cattivo" e sempre foriero di instabilità.⁴⁹³

A Wiener interessava, comunque, sottolineare un aspetto più complesso del semplice *feedback*, e cioè il ruolo distinto tra recettori ed effettori in relazione all'energia impiegata, che faceva emergere la nozione di *feedback* negativo in quanto messaggio di ritorno a fini di controllo e operante ad un livello energetico molto basso rispetto agli effettori. Secondo il *McCulloch Summary*, infatti, Wiener subito dopo aveva esteso il concetto di *feedback* negativo

«to reflexes and purposive activity by indicating that one merely needed to supply such a circuit with appropriate receptors and effectors. Thusly they became goal-seeking devices, of which he mentioned several, more particularly those which had built into them computing devices, some of which might so base their action on previous information as to guess the future. He closed by considering the compounding of such circuits one upon another so that the first operated upon a quantity and the second upon its derivative, etc» [p. 2].

Wiener aveva messo insieme molte idee profonde: la questione dell'accoppiamento informativo a bassa energia e dunque il ruolo degli organi sensoriali, ed il diverso ruolo degli attuatori, che riportano ad alti livelli energetici i risultati dell'elaborazione; la relazione tra calcolatori digitali, sensori ed attuatori; i dispositivi per la previsione. Normalmente quando si pensa al nesso tra Wiener ed il *feedback* la mente va immediatamente verso un contesto analogico, ma non è così. Come si vede, per Wiener il *feedback* era nozione appartenente tanto alla teoria analogica che a quella digitale.

Rosenblueth proseguì discutendo dei riflessi e dell'omeostasi nella pressione sanguigna, nelle funzioni respiratorie ecc. La discussione su questi argomenti fu un po' più animata di quanto era avvenuto la mattina. Gerard accennò ad un risultato sperimentale del suo allievo Roger Sperry, «motor control might be good even in the absence of afferents from the limbs». Ci si muoveva, come si vede, all'interno dell'ottica sperimentale che abbiamo riscontrato in Behavior, Purpose and Teleology dove, d'altro canto, si era accennato a comportamenti intenzionali non controllati mediante sensazioni propriocettive provenienti dalla mèta (si ricordi i casi della rana e del serpente). Pitts aggiunse come «one must expect random connections within the central nervous system». Era il suo tema d'elezione, su cui stava lavorando per la tesi di *Ph.D.*: l'idea di un cervello basato su reti neuronali stocastiche.

L'emergere di una prima "informatica teorica"

Rispetto alle idee espresse al Convegno di Princeton, entro i limiti imposti dalla scarsità di documenti su quest'ultimo, appariva ora un modo di trattare il computer digitale molto meno fine a se stesso, molto meno interessato alle tecniche di calcolo in sé. Si iniziava a profilare una teoria generale del computer, ci si permetta l'anacronismo linguistico, una prima "informatica teorica", che von Neumann avrebbe a breve chiamato "teoria degli automi".

⁴⁹³ Cfr. in proposito il lucido intervento di MacColl durante una delle discussioni avvenute nel corso della conferenza sui meccanismi teleologici che si tenne a New York i giorni 21 e 22 ottobre 1946 [cfr. *Teleological mechanisms*].

Anche se si può essere tentati di immaginare che il discorso di von Neumann a Princeton fosse stato simile, tra i due interventi era trascorso un anno, contraddistinto dal lavoro dei quattro gruppi, dalla stesura del *First draft* e da altre riflessioni in cui, evidentemente, nel modo di vedere di von Neumann aveva preso un ruolo via via crescente il lavoro di Turing “On computable numbers”, anche su sollecitazione dell’approfondimento delle vedute teoriche del saggio su “A Logical Calculus” di McCulloch e Pitts.

È interessante notare che il discorso di von Neumann si fa progressivamente più teorico nella misura in cui tende a guardare al computer con gli occhi di McCulloch e Pitts, cioè come ad un cervello. Con la nozione di automa – parola che von Neumann usa già nel novembre 1946 per comprendere il cervello umano e computer – si ha un termine teorico che rende possibile contraddistinguere un oggetto di studio generale comune alla neurologia e alla scienza dei computer. Si noti come fosse stata la neurologia – i ragionamenti sulle reti neuronali, sul ruolo di neuroni sensoriali e motoneuroni, le ipotesi sui modi in cui avviene la memorizzazione nel cervello – a permettere il passaggio da un approccio ingegneristico tipico del progettista di calcolatori a quello dello scienziato [cfr. Randell 1972]. Rispetto all’altro parallelo tra macchine e animali, quello confluito in “Behavior, Purpose and Teleology”, ora le parti si sono invertite. In quest’ultimo alcuni dei risultati ottenuti in ambito tecnologico, in particolare nella ricerca sui predittori, erano stati generalizzati ad inglobare gli organismi viventi; qui invece si parte da risultati in gran parte congetturali della neurologia (principalmente “A logical calculus”) che vengono estesi all’ambito tecnologico, e che permettono di inglobare i computer in una teoria scientifica ad alta generalità. Questo ritmo dalla macchina all’animale e viceversa, come fonte di scoperta scientifica, forma il tratto più caratteristico e suggestivo della Cibernetica.

Il ruolo avuto dalla neurologia in questo contesto è confermato da von Neumann in una lunga lettera a Wiener, del 29 novembre del 1946, dove scrive:

«Our thoughts – I mean yours and Pitts’ and mine – were so far mainly focused on the subject of neurology, and more specifically on the human nervous system, and there primarily on the central nervous system. Thus, in trying to understand the function of automata and the general principles governing them, we selected for prompt action the most complicated object under the sun – literally. In spite of its formidable complexity this subject has yielded very interesting information under the pressure of the efforts of Pitts and McCulloch, Pitts, Wiener and Rosenblueth. Our thinking – or at any rate mine – on the entire subject of automata would be much more muddled than it is, if these extremely bold efforts – with which I would like to put on one part the very un-neurological thesis of A. Turing – had not been made. Yet, I think that these successes should not blind us to the difficulties of the subject, difficulties, which, I think, stand out now just as – if not more-forbiddingly as ever».⁴⁹⁴

La lettera è, tra l’altro, una delle poche testimonianze dirette della stretta collaborazione avvenuta sul computer in tempo di guerra, da parte di Wiener, von Neumann e Pitts.⁴⁹⁵ Che con l’espressione “efforts of McCulloch and Pitts” ci si riferisca qui ad “A Logical Calculus” è probabile, sebbene i due autori potrebbero aver prodotto anche qualche altra cosa in relazione ai compiti assegnati al gruppo “4” dopo il Convegno di Princeton. Più difficile è capire a cosa si riferisca l’espressione “Pitts, Wiener and Rosenblueth”. Anche se non lo si può escludere, ho dei seri dubbi che von Neumann pensi alla ricerca sul muscolo cardiaco [Rosenblueth e Wiener 1945], a cui Pitts non aveva partecipato e che, comunque, sebbene orientata a trovare un modello di tessuto simile a quello formato dalle reti neuronali, non riguardava strettamente il cervello, né poteva essere stata utilizzata da von Neumann per il *First Draft*, nei progetti di modifica dell’ENIAC o di creazione dell’EDVAC e del nascente IAS computer. Nemmeno è

⁴⁹⁴ Lettera di von Neumann a Wiener, 29 Novembre 1946 (VNLC), General Correspondence, Box 7.

⁴⁹⁵ *Ivi*.

agevole riferirlo alla ricerca sul clono muscolare che Wiener, Pitts e Rosenblueth stavano conducendo nel 1946 [Wiener *et al.* (1985)] la quale, oltre ad essere molto incompleta, era anche lontana dal tema dei calcolatori di cui sta parlando von Neumann. Un'ipotesi alternativa potrebbe consistere nel vedervi un rinvio al rapporto già realizzato nell'ambito dei compiti dati da von Neumann all'indomani del Convegno di Princeton, forse lo stesso che era stato promesso da Wiener a von Neumann nella lettera del 24 gennaio 1945, ed alla cui stesura potrebbe aver collaborato Rosenblueth durante il soggiorno messicano di Wiener. Ma di esso non sappiamo nulla.

Von Neumann e la biologia molecolare

Nella lettera inviata a Wiener il 29 novembre 1946, von Neumann faceva seguire una considerazione che nel seguito autodefiniva una "anti-neurological tirade". Scriveva:

«What seems worth emphasizing to me is, however, that after the great positive contribution of Turing *cum* Pitts – and – McCulloch is assimilated, the situation is rather worse than better than before. Indeed, these authors have demonstrated in absolute and hopeless generality, that anything and everything Brouwerian can be done by an appropriate mechanism, and specifically by a neural mechanism – and that even one, definite mechanism can be "universal". Inverting the argument: Nothing that we may know or learn about the functioning of the organism can give, without "microscopic", cytological work any clues regarding the further details of the neural mechanism».⁴⁹⁶

Il ragionamento di von Neumann è il seguente: mettendo insieme i risultati di "On Computable Numbers" di Turing e quelli di "A Logical Calculus" di McCulloch e Pitts, si dimostra che un computer o un cervello umano sono delle macchine di Turing universali, dunque in grado di risolvere ogni problema computabile, di trattare dunque ogni "brouweriano", secondo la terminologia in uso presso la scuola di Hilbert che faceva coincidere i concetti esprimibili attraverso metodi finitistici con quelli intuizionistici. Tuttavia questa consapevolezza, a cui si perviene attraverso la teoria delle reti neurali, secondo von Neumann è "sottodeterminata" rispetto al cervello reale, in quanto non offre un modello unico, bensì una vasta classe di modi possibili di rappresentarlo, a motivo della equivalenza di comportamento degli elementi a scatto che compongono queste reti nel cervello, nel computer elettronico o in quello a relè dei BTL. Ma se è così, conclude von Neumann, allora vuol dire anche che ci sono molteplici modi equivalenti per modellizzare il cervello stesso; dunque "A Logical Calculus" non può fornire un modello sufficiente per guidare la ricerca su come il cervello sia veramente fatto e funzioni e, se nell'accingersi a redigere l'articolo, McCulloch e Pitts avevano fatto delle semplificazioni estreme sulla natura delle cellule neuronali, ora di nuovo al livello citologico occorreva ritornare, cioè occorreva tornare a studiare la cellula.

Von Neumann continuava la lettera insistendo sulla complessità davvero eccezionale del sistema nervoso centrale, su come esso fosse costituito da una parte digitale (neurale), ma anche molto probabilmente da una analogica (umorale o ormonale), ed infine da un costante *feedback* con l'ambiente esterno. Escludendo che la teoria della Gestalt potesse essere di un qualche aiuto, in quanto introduceva solo una indebita semplificazione di un sistema che aveva tutto il diritto di essere complicato.

La lettera ribadiva che la "sparata antineurologica" non andava presa come un attacco al progetto di ricerca che Wiener aveva avviato con Rosenblueth.⁴⁹⁷ Soltanto riteneva che fosse utile affrontare un oggetto meno complicato del cervello e che questo era la cellula. Parlando di

⁴⁹⁶ *Ivi.*

⁴⁹⁷ Pitts diede un contributo alla ricerca di Rosenblueth e Wiener (1946) sul cuore al ritorno di Wiener negli Stati Uniti nel 1945, partecipò invece a tempo pieno a quella sul clono nel 1946.

“complicazione” di un automa von Neumann pensava soprattutto al numero di unità di base che lo compongono. Tale approccio era sembrato sensato nella stima approssimata di automi come i computer, di cui si contavano il numero di elementi a scatto, 10^4 nel caso dell'ENIAC, e del cervello, di cui si contavano i neuroni centrali, stimati essere circa 10^{10} . A suo parere un approccio comparativo che avesse preso in considerazione cervelli di animali più semplici, come la formica, che si stimava avere 10^4 neuroni, o di esseri viventi ancora con 10^2 neuroni, non sarebbe stato possibile, perché in quel caso le parti digitali sarebbero state più semplici e quelle analogiche meno accessibili, i malfunzionamenti meno noti, e molto più povere le possibilità di comunicare con essi.

Von Neumann stimava invece che i “pezzi” che potevano comporre ad esempio il virus batteriofago studiato dal gruppo di Max Delbrück contava poche centinaia di migliaia di “mechanical elements”, che confrontato al numero di pezzi di una locomotiva, che stimava essere dell'ordine delle decine di migliaia, era una complessità abbordabile rispetto alla durata della vita umana. Von Neumann proponeva dunque a Wiener di studiare microorganismi di questo tipo con tecniche ispirate alla mentalità “elementarista” che gli era congeniale, proponendo di utilizzare metodi sperimentali che permettessero di “vedere” questi “pezzi”. Pensava a strumenti di osservazione con breve lunghezza d'onda; alcuni disponibili, come la spettroscopia a raggi X, adeguatamente (e qui egli pensava certamente alle competenze di Wiener) trattata mediante l'analisi di Fourier ed integrata con l'analisi chimica. Ed a strumenti con risoluzione migliore come la microscopia elettronica in via di sviluppo e la ancora inesistente microscopia protonica. Inoltre von Neumann si diceva in grado di sviluppare una teoria degli automi che si autoriproducono, e assicurava: «I did think a good deal about self-reproductive mechanisms. I can formulate the problem rigourously, in about the style in which Turing did it for his mechanisms».⁴⁹⁸

Questa proposta era certamente più congeniale a von Neumann rispetto all'approccio Wiener, Rosenblueth e Pitts. Come ha fatto notare Lily Kay, la riflessione di von Neumann va ricollegata alla Theoretical Physics Conference, con il patrocinio della George Washington University e la Carnegie Institution of Washington, tenutasi tra il 31 ottobre e il 2 novembre 1946, sul tema “The physics of living matter,” a cui avevano partecipato anche von Neumann e Max Delbrück. Da resoconti dell'epoca apprendiamo che si era trattato soprattutto dei «problems of heredity and the mechanisms by which the almost fantastic gene is able to imprint its characteristics on the cell constituents in a hereditary fashion»,⁴⁹⁹ e che vi si era parlato del lavoro di Delbrück sui batteriofagi. Altre notizie sono state rilevate da Tara Helen Abraham (2000, pp. 69-75). La relazione di von Neumann – come si apprende da un carteggio che von Neumann ebbe con il matematico e futuro biologo molecolare Sol Spiegelman (1914-1983) – ebbe per tema il possibile ruolo dei servomeccanismi, in particolare del *feedback* negativo, nell'accoppiamento dei cromosomi, ed una teoria dell'autoreplicazione degli automi.⁵⁰⁰ Spiegelman il 3 dicembre invitava von Neumann a scrivere una nota su questi temi, compresa «your self-duplicating machine».⁵⁰¹ Una settimana dopo von Neumann gli rispondeva di aver iniziato a buttar giù un abbozzo.⁵⁰²

Queste informazioni sono interessanti per vari motivi. Innanzitutto scopriamo che von Neumann aveva un forte interesse anche per il *feedback* (cosa che ci si sarebbe aspettati più da Wiener). In secondo luogo sorprende che qui non si stava soltanto affacciando la biologia molecolare del DNA, ma addirittura precorrendo le ricerche di Microcibernetica di Jacques

⁴⁹⁸ Lettera di von Neumann a Wiener, 29 novembre 1946 (VNLC) General Correspondence, Box 7.

⁴⁹⁹ Cfr. *News from Washington University 1946; Year Book CIW 1946*, pp. 77-8; Gamow e Abelson (1946).

⁵⁰⁰ Cfr. la lettera di Spiegelman a von Neumann, 3 dicembre 1946 (VNLC), citata in Abraham (2000, p. 73).

⁵⁰¹ Cfr. *Ivi*, p. 74.

⁵⁰² Cfr. la lettera di von Neumann a Spiegelman, 10 dicembre 1946. (VNLC) citata in Abraham (2000, p. 74).

Monod di venti anni dopo. Nella conferenza, comunque, non sembra von Neumann avesse mai nominato Wiener.

Alla conferenza erano presenti, oltre a biochimici e biologi, anche prestigiosi fisici e matematici come Tuve, Gamow, Szilard, Teller e Herman Weyl. Essa si iscriveva in una recente ma già ben radicata tradizione di ricerche e riflessioni da parte dei fisici ed aveva già prodotto un libro come *What is Life?* di Erwin Schrödinger (1944). La stessa espressione “biologia molecolare”, non si deve dimenticare, era stata coniata da Warren Weaver [cfr. Rees 1987, p. 503]. Non è assurdo, però, pensare che l’interesse di von Neumann, come quello degli organizzatori del ciclo di conferenze (che nel 1938 avevano avuto per tema la fusione nucleare, e nel 1939 la fissione nucleare), fosse ora legato alle più contingenti esigenze dei laboratori impegnati nello sviluppo dell’energia nucleare, per una indagine sulle conseguenze delle radiazioni ionizzanti sulla materia vivente, ed in generale per lo sviluppo della radiobiologia, settore quest’ultimo che ha accompagnato le ricerche di fisica atomica sin dal tempo di Madame Curie.⁵⁰³

Le ricerche di biologia molecolare del “gruppo fago” di Max Delbrück aprirono la strada alla scoperta del codice genetico, scoperta sulla quale non si può considerare neppure influente l’ottica concettuale introdotta dalla Cibernetica, che invitava a guardare all’organismo vivente come un sistema che elabora informazione.

In seguito von Neumann fece intervenire Delbrück al quinto convegno Macy, ma il suo lavoro non sembra aver suscitato particolare entusiasmo tra i presenti, né che Delbrück sia stato più di tanto attratto dalle discussioni delle Macy conferences [cfr. Heims 1991, pp. 106-110].

Von Neumann continuò a lavorare alla teoria degli automi che si autoriproducono, che divenne un capitolo della teoria degli automi che egli andò sviluppando. Tale teoria degli automi continuò a tenere saldamente il proprio fulcro intorno al paragone tra cervello umano e computer, e dunque muovendosi entro il recinto che delimitava il territorio cibernetico. Egli continuò a restare in contatto con il gruppo delle Macy Conferences, ritirandosi solo prima del nono incontro, come fece anche Wiener.

A Scientist Rebels

Per quanto riguarda la reazione di Wiener alla lettera di von Neumann non sappiamo né se l’incontro previsto con quest’ultimo si sia svolto, né conosciamo la reazione di quest’ultimo alla proposta. Ma è probabile che sia consistita in un “no”. Solo in una lettera del 1949, infatti, Wiener tornava sull’argomento dell’autoriproduzione degli automi, dicendo di averci riflettuto e che l’argomento gli sembrava interessante. Von Neumann gli rispondeva seccamente raccomandandogli di non farne parola con la stampa.

D’altro canto proprio nei giorni della lettera di von Neumann, in data 2 dicembre 1946, Wiener scriveva una esplosiva lettera che venne pubblicata sull’*Atlantic Monthly* sotto il titolo di “A Scientist Rebels”. Uno scienziato tenuto anonimo dalla rivista,⁵⁰⁴ ed interessato ai missili

⁵⁰³ Negli anni successivi si veda, per esempio, il congresso Yockey *et al.* (1958), patrocinato dall’Oak Ridge National Laboratory, il cui direttore Alvin M. Weinberg nella “Foreword”, (ivi p. IX.) spiega l’importanza che avevano le ricerche sull’«interaction of radiation and living matter» ai fini del laboratorio. Nel dopoguerra i laboratori che presero l’eredità del Manhattan Project – in particolare il Los Alamos National Laboratory e l’Oak Ridge National Laboratory – svolsero importanti ricerche di biologia molecolare. Un altro laboratorio in cui si svolsero importanti ricerche di biologia molecolare è il Cold Spring Harbor Laboratory, nei pressi di New York. Qui nel 1904 la Carnegie Institution of Washington aveva fondato una “Station for Experimental Evolution,” riorganizzata nel 1921 come Carnegie Institution Department of Genetics e dal 1933 è sede del congresso estivo Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology [cfr. Creager e Santesmases 2006].

⁵⁰⁴ Il destinatario della lettera, tenuto anonimo dal periodico, era Mr. George E. Forsythe della Physical Research Unit Boeing Aircraft Company di Seattle, come apprendiamo dalle lettere di risposta di Wiener, una del 31 ottobre e una del 2 dicembre 1946, ripubblicate in Wiener e Pach (1983).

autoguidati, aveva chiesto a Wiener di avere una copia dell'ormai esaurito *Yellow peril*. Wiener gli rispose infuriato invitandolo a rivolgersi al governo, sia perché ad esso la pubblicazione apparteneva di diritto, sia perché

«the policy of the government itself during and after the war, say in the bombing of Hiroshima and Nagasaki, has made clear that to provide scientific information is not a necessarily innocent act, and may entail the gravest consequence» [Wiener 1947b].

La scelta di far pubblicare la lettera spinse Wiener a rifiutare ancor più decisamente ogni coinvolgimento nei progetti di calcolatore. La vicenda avvenne oltretutto a ridosso del secondo storico congresso sui computer, il “Symposium of Large Scale Digital Calculating Machinery”, che si tenne presso l'Harvard Computation Laboratory dal 7 al 10 gennaio del 1947, che Wiener disertò, dopo che già non aveva parlato a quello del 1945. Qui Wiener, come riferisce un partecipante al convegno,

«was to speak on “The Problem of Gestalt.” At the last moment, he sent a telegram declining to participate. The ground he stated to the newspapers was that science was here being used toward destructive military purpose».⁵⁰⁵

Oltre a provocare un involontario attrito con Aiken, questa presa di posizione pubblica di non collaborazione spinse Wiener a rendere coerenti con essa le sue scelte future ed a rifiutare di assumere la responsabilità per un progetto di calcolatore del Bureau of Standard; rifiuto che faceva tutt'uno con la sua scarsa partecipazione al progetto del Rockefeller electronic digital computer dell'MIT. A quel punto la collaborazione con l'amico Rosenbluth e la partecipazione alle Macy Conferences divennero definitivamente porti di salvezza, collocati ancora dentro i confini della “scienza senza nome” ma – almeno secondo le speranze di Wiener – il più lontano possibile da finalità militari.

La nozione di informazione

Il 13 e 14 marzo 1947 si tenne il Terzo incontro Macy dove appaiono significative novità. In primo luogo vi viene introdotta la nozione di informazione come entropia negativa. Il ruolo centrale per i temi discussi alle Macy Conferences era già stato asserito con forza da Wiener nel corso del primo incontro. In particolare, la mattina del secondo giorno, lo psicologo Kubie discusse dei meccanismi ripetitivi nelle nevrosi usando espressioni come “energy to be released” o “psychic tension”, tipiche del linguaggio della psicanalisi; al ché, riferisce McCulloch, «Wiener pointed out that energy was the wrong concept to use with respect to communication systems which worked in terms of information» [*McCulloch's Summary*, p. 4].

I lavori di questo terzo incontro erano stati aperti da una relazione del neuro-anatomista von Bonin «on the quantitative estimates of the channels of input and output of the central nervous system» [*ivi*, p. 7]. Quindi era già stato introdotto un problema di comunicazione. Il pomeriggio era prevista una relazione di von Neumann sulle memorie nei calcolatori. Dato che tale relazione avrebbe dovuto trattare della misura dello spazio della memoria, fu l'occasione per una discussione tra Wiener e von Neumann. Riferisce McCulloch:

«This began with a discussion of entropy and information between him [von Neumann] and Wiener with Wiener's proposition that information is negative entropy, being the

⁵⁰⁵ E.C. Berkeley, “Design of Machinery for Reasoning and Computing,” 18 Nov. 1946, memorandum, Edmund C. Berkeley Collection 50, box 8, folder 52, CBI, citato in [Longo B. 2004], nota 28 p. 18; esiste anche un altro memorandum di E. C. Berkeley, “Symposium of Large Scale Digital Calculating Machinery at the Harvard Computation Laboratory, Cambridge, Massachusetts, January 7 to 10, 1947-Report,” 18 Nov. 1946, internal Prudential memorandum, Edmund C. Berkeley Collection 50, box 8, folder 52, CBI. [*ivi*]. Qualche giorno prima Wiener aveva però partecipato alla Princeton University bicentennial conference on problems of mathematics, 17-19 dicembre 1946.

logarithm of a probability (entropy) and the logarithm of its reciprocal (information) respectively» [ivi, p. 7].

Occorre ricordare che l'espressione "entropia negativa" era stata introdotta nel 1944 da Schrödinger in *What is Life?* nel capitolo 6° su "Order, Disorder and Entropy", cui scrive che

«a living organism continually [...] produces positive entropy - and thus tends to approach the dangerous state of maximum entropy, which is of death. It can only keep aloof from it, i.e. alive, by continually drawing from its environment negative entropy [...]. What an organism feeds upon is negative entropy» [Schrödinger 1944].

In una nota al libro Schrödinger rispondeva alle critiche pervenutegli da alcuni fisici per tale scelta terminologica, sostenendo che era stata dettata da esigenze di divulgazione e che sarebbe stato più opportuno in quel contesto parlare, piuttosto che di entropia negativa, di energia libera. Egli aveva comunque fatto riferimento all'ordine piuttosto che all'informazione. L'idea di Wiener risale ad un intreccio di suggestioni, tra cui c'era anche il suggerimento di *What is Life?*, che egli doveva certamente aver letto. Esse ci vengono esposte in «Time, Communication and nervous system», un lungo articolo che compare negli atti del Convegno su "Teleological Mechanisms" che si era tenuto nell'autunno 1946 sotto il patrocinio della New York Academy of Sciences, e che è stato certamente rimaneggiato in maniera profonda in vista della pubblicazione. Scrive Wiener:

«Entropy here appears as the negative of the amount of information contained in the message. [...] Thus, essentially, amount of information is the negative of entropy» [Wiener 1948a, 203-4].

I motivi di questa scelta terminologica da parte di Wiener sono indicati da una serie di suggestioni incrociate. La prima è data dalla scelta di misurare la quantità di informazione mediante il logaritmo per poterne assicurare l'additività:

«information from two independent sources accumulates additively while their probabilities are multiplied, and that a variable which increases additively while another increases multiplicatively is, except for a constant factor, the logarithm of the second» [Wiener (1948a), 203-4].

Inoltre c'era da considerare il fatto che la nozione di informazione era stata inserita da Wiener in quella che egli chiamava "Meccanica statistica di Gibbs", considerando il messaggio come scelta di un *ensemble* a cui era associata una distribuzione di probabilità. Diveniva naturale dunque ragionare di informazione, in quanto misura dell'ordine, come opposta all'entropia, come misura del disordine. C'era infine la potente suggestione di una sorta di seconda legge della termodinamica applicabile all'informazione.

«No communication mechanism, whether electrical or not, can call on the future to influence the past, and any contrivance which requires that, at some stage, we should controvert this rule, is simply unconstructible. Not only this principle is used in a way similar to the second law of thermodynamics, but it is really identical with it. Another completely equivalent statement says that, once a message has been formed, a subsequent operation on it may deprive it of some of its information, but can never augment it» [ivi, p. 203].

Quello citato era il principio di causalità che Wiener aveva richiamato nella sua teoria della previsione e del filtraggio, che implica che un messaggio non può mai essere completamente previsto. Esso ha una formulazione perfettamente equivalente nel dire che qualsiasi operazione si compia su un messaggio non può mai aumentarne il contenuto informativo iniziale. Si capisce dunque come le ragioni che spingono Wiener a parlare di informazione come entropia negativa non siano affatto banali. Tuttavia si tratta solo di una scelta terminologica che può risultare fuorviante, in quanto la neghentropia così intesa non è un concetto termodinamico, come mostra tra l'altro la sua adimensionalità. La neghentropia in quanto quantità di informazione è un concetto comunicazionale che si oppone non all'entropia termodinamica, ma

ad un concetto comunque comunicazionale, e questa “entropia comunicazionale” è semmai la misura del rumore o qualcosa di molto simile. Qui troviamo uno dei vizi, che per altri versi sono anche una virtù di Wiener (in quanto fonte di forti suggestioni euristiche): la sua tendenza ad essere avvinto dalle analogie formali in quanto matematico. Probabilmente, a scavare, alla somiglianza formale di entropia e quantità di informazione (a meno del segno, di una costante moltiplicativa e delle dimensioni) corrisponde un concetto più generale di tipo matematico, che spiega perché la termodinamica statistica di Boltzman giunga ad una espressione simile della teoria dell’informazione di Shannon e Wiener, ma non è detto che tale comunanza formale sia sufficiente per una vera e propria unificazione teorica, che Wiener non mi sembra nemmeno aver voluto condurre fino in fondo. Infatti scrive: «We now propose to introduce ideas belonging to the Gibbsian statistical mechanics into the theory of communication» [ivi, p. 202], intendendo di voler prendere modelli formali da una parte e trasportarli dall’altra, ma senza voler giungere ad una reale fusione delle due teorie.

Nel terzo incontro Macy si assistette anche ad un interessante richiesta di von Neumann, che il giorno successivo chiese si discutesse della coscienza e del suo substrato anatomico. Secondo von Bonin probabilmente riguardava qualche zona del mesencefalo più che della corteccia, in quanto quest’ultima si occuperebbe maggiormente di consentire la conoscenza, più che di aver conoscenza di star conoscendo. Fremont-Smith parlò di gradi differenti di coscienza: dalla piena attenzione, agli stati crepuscolari, al sonno, all’amnesia isterica [cfr. *McCulloch’s Summary*]

Il tema della causalità circolare divenne definitivamente periferico e Gregory Bateson scrisse il 27 marzo 1947 a Rosenblueth e Wiener se non fosse possibile in qualche modo avere «a good general statement of the properties of *feedback* systems». ⁵⁰⁶ Desiderio che non risulta sia mai stato soddisfatto.

⁵⁰⁶ Lettera di Bateson a Rosenblueth e Wiener, 27 marzo 1947 (WAMIT), citata da Hellman (1981, p. 253).

Capitolo 11 – Uno sguardo alla prima Cibernetica inglese

Poco dopo il terzo convegno Macy, del marzo 1947, Wiener si recò in Europa per prendere parte a Nancy al “Premier Colloque International sur l’Analyse Harmonique”,⁵⁰⁷ che si svolse tra il 15 e il 22 giugno 1947, organizzato e presieduto da S. Mandelbrojt.⁵⁰⁸ Questo viaggio ebbe un importante ruolo nella storia della Cibernetica *in fieri*, almeno per due motivi. In primo luogo perché, in Francia, Wiener ricevette la proposta di scrivere *Cybernetics* da parte di Enrique Freyman, il direttore della casa editrice Hermann & C.ie dal 1927 al 1956,⁵⁰⁹ che si era mostrato molto interessato ad un libro in cui fossero esposte «my ideas concerning communication, the automatic factory, and the nervous system» [Wiener 1956, p. 316]. In secondo luogo, per il fatto che dopo un quinquennio trascorso sempre negli Stati Uniti, a parte le sortite a Città del Messico, egli poté finalmente avere contatti internazionali. Il viaggio fu l’occasione per far visita, come usava fare prima della guerra, ai suoi vecchi amici inglesi, soprattutto al fisiologo e genetista J. B. S. Haldane. Fece anche un giro dei principali centri in cui si svolgevano ricerche affini alla Cibernetica. E’ interessante quindi, proprio a questo punto del nostro discorso, dare uno sguardo a come esse si erano sviluppate in parallelo a quelle americane.

La recezione del profondo lavoro sulla teoria della previsione e del filtraggio svolto da Wiener nel biennio 1940-1942 è uno dei requisiti indispensabili per capire la Cibernetica britannica; d’altra parte, tutte le ricerche del tempo di guerra statunitensi risentivano profondamente a loro volta dei risultati britannici, ed in generale la collaborazione e l’interscambio di risultati tra Stati Uniti, Gran Bretagna e Canada, furono intensi per tutto il quinquennio 1940-1945. L’interazione tra le due sponde dell’Atlantico, già presente prima – si pensi per esempio all’importante influenza che Turing e la teoria della ricorsività avevano avuto sul finire degli anni Trenta sull’ambiente statunitense – divenne strettissima dalla missione Tizard in poi, che sicuramente influenzò il progredire delle ricerche americane sul radar e sulla fissione nucleare.

La Missione Tizard

In Inghilterra si era formato nel 1935 il Committee for the Scientific Survey of Air Defence (CSSAD), sotto il controllo dell’Air Ministry, presieduto da Sir Henry Tizard. Nella primavera 1940 era maturata la convinzione della necessità che la Gran Bretagna inviasse i propri risultati tecnico-scientifici più avanzati negli Stati Uniti perché venissero sfruttati mediante le enormi potenzialità industriali americane. La caduta della Francia e il preannunciarsi della Battaglia

⁵⁰⁷ “Premier Colloque International Sur l’Analyse Harmonique”, Nancy 1947; organizzato e presieduto da S. Mandelbrojt, finanziato dal Centre National de la Recherche Scientifique, francese e dalla Fondazione Rockefeller. Cfr. S. Mandelbrojt, “Avant-propos,” in *L’Analyse Harmonique dans le Domaine Complexe*, Berlin - Heidelberg, Springer, 1973, pp. 1-4, p. 1.

⁵⁰⁸ L’Università di Nancy era allora, da due anni, la sede accademica di un astro nascente della matematica mondiale, cioè Laurent Schwartz, che prende virtualmente in questo Colloquio il testimone della ricerca sulle teoria delle distribuzioni, tema da tempo particolarmente caro a Wiener. Masani riporta il riconoscimento da parte di Schwartz della priorità di Wiener nella scoperta delle distribuzioni: «Elle [l’idée de distribution] a tourmenté de nombreux mathématiciens, comme le montrent ces quelques pages. Or Wiener donne une très bonne définition d’une solution généralisée; j’en avais, dans mon livre sur Les Distributions, attribué les premières définitions à Leray (1934), Sobolev (1936), Friedrichs (1939), Bochner (1946), la définition la plus général étant celle de Bochner; or la définition de Wiener est la même que celle de Bochner, et date donc de ce mémoire, c’est-à-dire de 1926, elle est antérieure à toutes les autres.» (Schwartz, Coll. Works, II, p. 427).» [Masani 1990, p. 101].

⁵⁰⁹ Cfr. la presentazione che la casa editrice fa di se stessa <http://www.editions-hermann.fr/presentation.php>

d'Inghilterra fecero cadere ogni indugio e nel luglio 1940 Churchill e Roosevelt presero accordi per una missione britannica negli Stati Uniti; in agosto venne costituita la cosiddetta Commissione Tizard, che si recò in America con una valigia colma di risultati segreti.⁵¹⁰ Della commissione, oltre a Tizard facevano parte anche John Cockcroft, responsabile per le ricerche atomiche e E. G. Bowen per quelle sul Radar. Tizard, che aveva preceduto il resto dei componenti, il 31 agosto 1940 si incontrò a Washington con il capo dell'NDRC e del NACA Bush e con lui organizzò una serie di incontri con le diverse sezioni del neonato NDRC. Il 19 settembre si svolse un incontro con Alfred Loomis e Karl Compton, nel corso del quale si discusse delle ricerche sul radar, e Bowen e Cockcroft mostrarono il "cavity magnetron", un trasmettitore centimetrico molto potente. Si concordò che BTL e General Electric avrebbero sviluppato su scala industriale questi sistemi. La commissione ebbe anche incontri per discutere del motore jet sviluppato da Sir Frank Whittle, del rilevamento dei sommergibili e della bomba a fissione.

Il Servo Panel

Le ricerche sui predittori ed in generale nell'ambito di controlli automatici e radar furono dunque soggette a influenze reciproche. Come negli Stati Uniti, in Gran Bretagna, prima del 1939, erano scarsissime le ricerche sui controlli automatici condotte presso le università e non esistevano corsi, ad eccezione dell'attività riguardante i calcolatori analogici di Douglas Rayner Hartree all'Università di Manchester, che nel 1934 aveva sviluppato un analizzatore differenziale meccanico di prova del tipo di Bush, e che nel 1935 aveva avviato con la Metropolitan-Vickers il progetto di un analizzatore differenziale di grandi dimensioni da 8 integratori, del quale fu consulente lo stesso Vannevar Bush. Allo scoppio della guerra era l'analizzatore più grande al mondo [cfr. Porter 1965, p. 330].

Le principali ricerche sui controlli automatici si svolgevano fuori dell'ambito accademico, in particolare presso l'Admiralty Research Laboratory (ARL), il Royal Aircraft Establishment (RAE) e i laboratori di ricerca di industrie navali, chimiche ed elettriche. I primi predittori meccanici di cui abbiamo parlato nel capitolo secondo e da cui era scaturito anche l'americano M4 Sperry Gyroscope erano stati sviluppati dall'ARL e dalla Vickers-Armstrong [cfr. *ivi*]. Gli inglesi svilupparono tra l'agosto 1940 e il giugno 1941 anche un complesso sistema di controllo per il fuoco antiaereo munito di radar, predittore, batteria antiaerea ed un vasto equipaggio (GL Mark I) nel quale emersero i tipici problemi apparsi contemporaneamente negli Stati Uniti e su cui aveva discusso la squadra di Wiener e quella dei BTL nel convegno del 4 giugno 1941, in particolare quello del rumore che rendeva i dati provenienti dal radar inadatti alla previsione e degli operatori umani, da ritenersi come una delle principali fonti di questo rumore. Tra il 1940 e il 1942 diversi gruppi di ricerca si dedicarono ai problemi del rilevamento e della previsione. Tra i più importanti si possono citare quello di P. M. S. Blackett per l'Esercito; quello di Clausen e Ford per la Marina; quello di F. C. Williams al Telecommunications Research Establishment (TRE), per conto dell'Aeronautica; quello di due gruppi legati alla Metropolitan-Vickers rispettivamente guidati da A. L. Whiteley e da Arnold Tustin [cfr. *ivi*].

Un ruolo importante nella chiarificazione dei metodi e delle teorie dei controlli automatici ebbe il Servo Panel, un comitato sui servomeccanismi formato da qualche decina di esperti. Creato informalmente nel marzo 1942 per coordinare le ricerche in questo campo, sotto la presidenza di Hartree, ufficializzato nel 1944 come Technical Committee on Servomechanisms del Ministry of Supply, il Servo Panel era nato da un'idea di A. K. Solomon, un americano

⁵¹⁰ Cfr. Rowe (1948), pp. 4-5; Cunningham *et al.* (1984); Kirby e Capey (1997).

allora era presso l'Aerial Delivery Research and Development Establishment (ADRDE). Era anche stato fortemente voluto da F. A. Vick, uno dei principali responsabili della ricerca presso il Ministry of Supply e da Sir John Cockcroft, il capo dell'ADRDE.

Oltre al Servo Panel sorsero altre commissioni, come il Servo Nomenclature Committee, dedicato alla definizione della terminologia e il Manual Tracking Panel, dedicato allo studio del rapporto uomo-macchina. Nel 1944 venne creata una struttura più ufficiale presso il Ministry of Supply, all'interno della quale questi comitati operarono, il Technical Committee on Servomechanisms.

Percy J. Daniell

Nel corso dei lavori, si unirono al Servo Panel anche due nostre conoscenze dell'MIT, Samuel Caldwell e Gordon S. Brown. Il comitato si occupò tra le altre cose dell'«application of frequency-response methods to control-systems synthesis» [ivi, p. 332]. I primi lavori concreti presentati sull'argomento furono presentati da Arnold Tustin e Gordon Brown. Così americani e inglesi formarono un unico crogiolo, principalmente nel periodo 1942-45, da cui emerse la teoria classica dei controlli automatici basata sull'estensione dei metodi frequentistici degli amplificatori elettronici ai dispositivi per i controlli automatici. Che un influsso wieneriano sul Servo Panel vi sia stato è più che probabile, se si analizza il lavoro svolto dai membri del Panel direttamente sulle ricerche di Wiener. Arthur Porter, che fu segretario del Panel, ci informa che uno dei punti in discussione fu «the basic theory of control systems, with particular reference to the work of Norbert Wiener on the characteristics of stationary time series» [ivi]. È estremamente interessante scoprire che «to study the problem of filtering radar information, with special reference to the automatic-tracking problem» [ivi], all'inizio del 1942, il Servo Panel chiese la collaborazione di Percy J. Daniell, un matematico dell'Università di Sheffield, che produsse numerosi rapporti segreti, tra cui uno dei principali consistette nel «translate Norbert Wiener's work on the interpolation and extrapolation of stationary time series, which in turn formed the mathematical basis of Wiener's "cybernetics"» [ivi]

Che ci si fosse rivolti a Daniell (1889-1946) per la “traduzione” (cioè per la semplificazione in termini comprensibili ai profani) della teoria dello *Yellow Peril* è davvero sorprendente. E forse questo deve avere almeno un po' sorpreso anche Wiener, che in *Cybernetics* mostra di sapere dell'esistenza di questo riassunto di Daniell.⁵¹¹ Daniell è un personaggio conosciuto bene da chi si occupa dell'itinerario scientifico di Wiener, in quanto lo studio delle ricerche giovanili di Daniell aveva svolto un importante ruolo nelle prime ricerche matematiche dell'ancor più giovane Norbert Wiener, allora alle prese con la scoperta che lo rese famoso: il “processo di Wiener” che egli introdusse all'inizio degli anni Venti.⁵¹² La carriera di Wiener si era poi dipanata come una sorta di sviluppo e approfondimento di quella prima ricerca, confrontandosi a fondo con gli studi dell'ingegnere inglese Heaviside, fino a giungere allo *Yellow Peril*.

Daniell, al contrario di Wiener, aveva poi percorso una carriera meno fortunata, a Sheffield, luogo noto allora quasi soltanto per le sue acciaierie. Eppure era ancora una delle poche persone in Gran Bretagna, forse l'unica, ad essere in grado di capire a fondo la matematica dello *Yellow Peril*. Gli anni di guerra significarono così per Daniell un periodo di risveglio e di

⁵¹¹ «Thus in one way or another, the end of the war saw the ideas of prediction theory and of the statistical approach to communication engineering already familiar to a large part of the statisticians and communication engineers of the United States and Great Britain. It also saw my government document [lo *Yellow Peril*], now out of print, and a considerable number of expository papers by Levinson, Wallmann, *Daniell*, Phillips, and others written to fill the gap.» *Cybernetics* 2. Ed. p. 16; trad it 1982, p. 39. Il corsivo è mio.

⁵¹² Vedi soprattutto il saggio Wiener (1923).

intensa e profonda attività matematica a fini applicativi in connessione con le attività del Servo Panel, ricerche in gran parte rifluite in rapporti segreti.⁵¹³ La morte purtroppo lo colse nel 1946 mentre stava lavorando ad un volume su *The Theory of Closed-Cycle Systems* [cfr. l'importante articolo su Daniell di Aldrich 2007]. Nel suo riassunto dello *Yellow Peril*, Daniell scriveva:

«any future theory of statistical fluctuations and of prediction problems will certainly be built on the fundamental ideas expressed in the manual. The technique is a logical extension of Heaviside calculus necessary for such studies».⁵¹⁴

Non mancava di segnalare le difficoltà che comportava il dover trovare

«the proper connections between the methods of the manual [di Wiener] and the practical criteria used at present in the design of predictors and filters».⁵¹⁵

Arnold Tustin

È importante dedicare alcune osservazioni anche ad Arnold Tustin (1899-1994). Come detto nel primo capitolo si deve a lui la creazione dei grafi di flusso, che in genere si fanno risalire a Samuel J. Mason, che li battezzò “*Signal flow graphs*”.⁵¹⁶ Come ha mostrato Bennett, e come riconobbe lo stesso Mason, essi erano usati durante la guerra da Tustin.⁵¹⁷ Tustin era però polemico sulla scelta dell'espressione “*Signal flow graphs*”, ed ha asserito in una conversazione con Bennett (1993, p. 136) che «they are not signals and they are not flows, they are cause and effect diagrams».

In questo senso, nonostante avesse sposato in pieno l'approccio frequentistico tanto da applicarlo agli stessi operatori umani, Tustin non vedeva in ciò nessuna ragione per dare del *feedback* e dei controlli automatici una interpretazione informazionistica, come invece tesero a fare la maggior parte degli studiosi americani sulla scorta di Wiener e del *Yellow peril*.⁵¹⁸

Un altro aspetto che distingue l'approccio alla Teoria dei controlli automatici tipico di Tustin rispetto a Wiener è l'apertura alle applicazioni della Teoria alle scienze sociali ed in particolare all'economia politica, tema sul quale nel 1954 pubblicò il libro *The Mechanism of*

⁵¹³ È interessante rileggere i titoli dei suoi principali lavori di allora: P. J. Daniell (1942), *Analogy between the Interdependence of Phase-shift and Gain in a Network and the Interdependence of Current and Potential Flow in a Conducting Sheet*, Report in Servo Panel Library B. 39; P. J. Daniell (1943), *Interpretation and Use of Harmonic Response Diagrams (Nyquist Diagrams) with Particular reference to Servomechanisms*, Report No. 1 and pp. 1-12 of Selected Government Research Reports Volume 5: Servomechanisms, London, Her Majesty's Stationery Office 1951; P. J. Daniell (1944), *Operational Methods for Servo Systems*, Servo Panel Report S 1, luglio 1944 published as Report No. 2 and pp. 13-33 of Selected Government Research Reports Volume 5: Servomechanisms, London, Her Majesty's Stationery Office 1951; P. J. Daniell (1944), *Digest of Manual on the Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications*, by Norbert Wiener, OSRD Report 370, Servo Panel Library, p. 47, circa 1944; P. J. Daniell (1944), *Backlash in Reset Mechanisms*, C. S. Memo 199, 16 March 1945; P. J. Daniell (1944) *An Explanatory Note on H. W. Bode's Paper on the Relation between Phase-lag and Attenuation* (Bell Journal 19 (1940) p. 421), C. S. Memo 201, 21 March 1945; P. J. Daniell (1946) *Contribution to Discussion in the Symposium on Autocorrelation in Time Series*, Journal of the Royal Statistical Society, Supplement, 8, 88-90.

⁵¹⁴ P. J. Daniell, *Digest of Manual on “the extrapolation [...]”,* SRD1 PR 328, circa marzo 1943. Cito da Bennett (1994, p. 61, e nota 24).

⁵¹⁵ *Ivi*.

⁵¹⁶ Cfr. Mason (1953a e 1953b) e Percival (1953 e 1955).

⁵¹⁷ Cfr. Tustin (1952). Su Tustin vedi soprattutto Bissell (1994 e 2010).

⁵¹⁸ In Tustin (1950) discute dell'importanza dei concetti di energia e di stoccaggio dell'energia nei sistemi di controllo. Cfr. Bennett (1993, p. 159, nota 21). Tustin è anche autore del volume: Tustin, Arnold, *The mechanism of economic systems : an approach to the problem of economic stabilisation from the point of view of control-system engineering*, London : Heinemann, 1953. Su Tustin vedi anche Bissell, Chris (2010). “Not just Norbert,” *Kybernetes*, 39(4), pp. 496–509.

Economic Systems,⁵¹⁹ che al suo apparire fu recensito da Tizard (1957) come «A cybernetic interpretation of economics».

Craik e lo studio del fattore umano

Il “Manual Tracking Panel”, dal febbraio 1944 presieduto da O. M. Solandt, si occupò dello studio del «behaviour of human operators and the way in which they interacted with machines was an urgent requirement» [Porter 1965, p. 333]. Esso coordinò le attività di ricerca in psicologia applicata a scopi bellici che dallo scoppio della guerra si svolsero presso il Psychological Laboratory dell’Università di Cambridge, e che dal 1944 erano state istituzionalizzate con la creazione, mediante il concorso del Medical Research Council [MRC] e dell’Università di Cambridge, di una Unit in Applied Psychology, la cui direzione era stata affidata a K. J. W. Craik, e che nel 1946, dopo la sua morte, passò a Bartlett.⁵²⁰ A Cambridge, Craik si occupò dell’interazione uomo-macchina e collaborò con Tustin, per determinare le caratteristiche della risposta in frequenza degli operatori umani addetti ad alcune strumentazioni. Altre ricerche sulla simulazione del complesso uomo-macchina vennero svolte da Uttley, Hick, Bates e Mackworth, che estesero le idee di Craik.⁵²¹

Nel dopoguerra la lettura delle opere di Craik – di quelle pubblicate e di quelle che aveva in preparazione quando morì⁵²² – colpì molto in quanto mostravano un modo di sentire affine a quello espresso nel lavoro di Wiener, Rosenblueth e Bigelow del 1943. Kenneth Craik (1914-1945) aveva seguito studi di filosofia e psicologia come *undergraduate student* presso l’Università ad Edimburgo, per poi studiare come *research student* a Cambridge, con lo psicologo applicato Frederic Bartlett, a cui era stato presentato dai suoi precedenti professori come giovane genio.⁵²³ Dopo aver meditato su una possibile tesi sulla filosofia della psicologia, su suggerimento dello psicologo Randon Smith, che si occupava di psicoacustica del laboratorio di psicologia di Cambridge, cominciò a lavorare sulla psicologia della visione, in particolare sull’adattamento dell’occhio ai vari gradi di illuminazione. La tesi di *PhD.* del 1940 aveva come titolo *An Experimental Study of Visual Adaptation, and a Discussion of some more general Psychological Problems*. Vi si studiavano i meccanismi di adattamento dell’occhio, senza trascurare questioni di fotochimica, processi di eccitazione neuronale e gli effetti di eccitazione elettrica e meccanica dell’occhio. La tesi era un naturale viatico per le ricerche di guerra. Partecipò alle ricerche per l’individuazione dei sottomarini, per la progettazione di un fotometro notturno per l’artiglieria, sulla visione dei piloti degli aerei e di carri armati. Come Turing, Pitts e Shannon, anche Craik (con Richard Feynman, per fare un nome meno strettamente vicino alla Cibernetica) appartiene a quella generazione di giovanissimi scienziati geniali che si trovarono negli anni di massima creatività risucchiati nel vortice delle ricerche di

⁵¹⁹ Cfr. anche Tustin (1957).

⁵²⁰ Cfr. il rapporto con le attività dell’Unità durante la guerra “The Psychological Laboratory. University of Cambridge. Unit in Applied Psychology”, 1946 fotocopione dell’originale reperita in rete sul sito della Medical Research Council Cognition and Brain Sciences Unit, <http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/history/electronicarchive>

⁵²¹ Sullo studio della risposta in frequenza dell’operatore umano, cfr. Porter (1965, p. 332), nonché Bennett (1993, p. 167). Tra i principali rapporti non pubblicati, vanno citati in particolare J. A. Uttley, “The human operator as an intermittent servo”, 5th meeting of the Manual Tracking Panel of the Servo-Panel, 17/8/1944; K. J. W. Craik, “Physiological and Psychological Aspects of Gun Control Mechanisms” Pt. II, B.P.C. 43/254, Marzo 1944; K.J.W. Craik e M.A. Vince, “Physiological and Psychological Aspects of Gun Control Mechanisms,” Pt. III, B.P.C. 45/405, Febbraio 1945; Idem, “The Design and Manipulation of Instrument Knobs,” M.R.C. Report 46/272, A.P.U., 14 gennaio 1945. Nell’immediato dopoguerra uscirono: Tustin (1947a e 1947b), Craik (1947 e 1948), Bates (1947).

⁵²² Oltre a numerosi rapporti, Craik pubblicò in vita il volume Craik (1943); un volume successivo [Craik 1966], incompleto al momento della morte, fu pubblicato postumo.

⁵²³ Per un quadro complessivo su Craik: Bartlett (1946); Zangwill (1980); Collinson (2002).

guerra, affiancati da altri scienziati o alti ufficiali che pendevano dalle loro labbra nelle questioni scientifiche. Scriverà il suo maestro Bartlett:

«From 1939 to 1945 it is the simple truth to say that he was a key man in the scientific service of the country. [...] In these years he was to meet and almost immediately to win the confidence of all sorts and conditions of men, from scientists of international repute in very many different subjects to laboratory assistants and working mechanics; from Admirals, Generals and Air Marshals to ratings, privates and airmen; from leaders in industry to the rank and file of the workers. When he made any definite pronouncement everybody was sure at once that he knew what he was talking about» [Bartlett 1946, 111].

Nel 1943 Craik pubblicò il libro *The Nature of Explanation*, in cui si oppongono ai tradizionali metodi “verbali” della filosofia l’applicazione di “self-validating procedures of experiment and hypothesis”. La natura del pensiero è articolata nel seguente modo: traduzione di eventi esterni in simboli, ragionamento come elaborazione di simboli che conduce a previsioni, ritraduzione dei simboli nei termini di eventi esterni. Questo processo secondo Craik, equivale alla costruzione di un modello manipolabile della realtà, come accade con il modello di un ponte, con una macchina calcolatrice, un analizzatore differenziale di Bush o il predittore delle maree di Lord Kelvin. Craik non distingue tra calcolatori digitali e analogici: a suo parere si basano tutti sul principio di rappresentare la realtà mediante la riproduzione di un modello leggero e dunque facilmente gestibile.

Nell’abbozzo di un libro iniziato nel 1943 e pubblicato postumo insieme ad altri scritti, sotto il titolo di *The Mechanism of Human Action*, si introducono due possibili metodi di studio da usare in modo combinato: uno “analitico”, che studia i processi psicologici fisiologici e psicologici negli animali e nell’uomo; ed uno “sintetico”, che indica i principi che un organismo dovrebbe seguire per la realizzazione di determinati comportamenti sulla base del parallelo con meccanismi artificiali. Scrive Craik:

«On the synthetic approach, we shall go in somewhat greater detail into the theory of a selfregulating and servo-mechanisms, with their sensory, computing, control-valve and power units; their positive and negative *feedback* with and without time constants; the effect of time lags and different control functions on their stability; and the available methods of obtaining qualitative variations in response, both as regards spatial and temporal patterns; and the possibilities of imitating mechanically the “grouping” and “generalising” powers of animals and men.

Similarly, in the analytic approach we shall take examples from existing knowledge of the structure and function of sense-organs in man and animals, of the transmission of impulses in nerve fibres and synapses, and the control of the muscular responses. Sometimes we may take examples from the simpler internal self-regulating systems of the body (such as temperature regulation and the regulation of breathing) where, again, the behaviour of the system is determined by its requirements, and purposiveness is apparent at an unconscious level»

Un buon esempio del duplice metodo lo troviamo in un articolo uscito in due parti nel marzo e aprile del 1945 su una “Theory of the human operator in control systems”. Nella prima parte, su “The operator as an engineering system”, Craik descrive il comportamento dell’operatore umano come se fosse un servomeccanismo, diremmo “behavioristicamente”, come caratterizzato da una tendenza alla correzione intermittente e da processi di contrasto che danno all’azione un’apparenza di continuità; poi dice come si può costruire una macchina dotata di quelle caratteristiche; infine avanza ipotesi su come l’essere umano sia costituito dal punto di vista fisiologico per dar conto di tale comportamento.

Soffermiamoci sull’ultimo aspetto. Dato che il dispositivo in oggetto deve eseguire delle operazioni di derivazione e integrazione, per i primi ipotizza l’esistenza di «spatial differentiating systems». L’integrazione invece potrebbe forse essere effettuata mediante «‘autorhythmic’ nervous centres», in cui si hanno dei circuiti neuronici chiusi, studiati, come

Craik dice esplicitamente, da Lorente de Nó e da Ransom, tali che possano consentire dei *feedback* positivi [Craik 1947, p. 60].

Tutto il ragionamento si svolge in termini comunque fortemente analogici, secondo il tipo di tecnologia dei controlli automatici in cui Craik fu coinvolto durante la guerra, che non utilizzava né immaginava di utilizzare dispositivi digitali. A Craik non sfugge che nel caso del cervello umano occorrerebbe considerare anche sistemi digitali (termine che non usa). Scrive, chiudendo l'articolo:

«We should also consider long—lasting changes of stimulus-response relationship (i.e. learning) which, in an electrical model, would probably require to be imitated by some autoselective switching device rather than regarded as time-constants of a resistance-capacity system. Another type of control demands the establishing of complex response-patterns which are ‘triggered off’ as a whole by the stimulus. Instances are the action of word-habits in typewriting, or of blocks of stimuli in transmitting morse, or of associated movement groups in knitting. These seem to require some ‘sequencing’ switchgear, of the type used in the Relay Automatic telephone system, and make us think of the physiologists’ ‘chain reflexes’ and of rhythmic reflexes such as walking and breathing» [Craik 1947, p. 61].

Queste riflessioni sono riprese nella seconda parte dell'articolo - inviata in aprile a ridosso della sua morte - che ha per titolo “Man as an element in a control system”, dove si considerano che l'operatore umano come un dispositivo composto da un sistema di sensori, da un calcolatore che ricalcola la distanza tra mira e obiettivo, da un amplificatore e da un sistema di effettori [Craik 1948 p. 142]. Il “computing system” è collocato certamente a livello corticale, tuttavia egli dubita che sia costituito da «a ‘switching’ mechanism» [Craik 1948 p. 146]. Piuttosto il comportamento, per così dire, digitale potrebbe essere d'aiuto nello spiegare come si costituiscano insiemi di stimoli appresi che formano un tutt'uno per consentire comportamenti complessi molto rapidi, come lo scrivere sulla macchina da scrivere o come suonare il piano, cioè nello strutturarsi di schemi comportamentali prestabiliti [Craik 1948 p. 147].

L'abbozzo del libro *The Mechanism of Human Action* riflette i concetti fondamentali dell'approccio di Craik, la comparazione con le macchine, la dominanza della tecnologia analogica ed il fondamentale ruolo svolto dalla teoria (analogica) dei controlli automatici. Come l'approccio di Tustin alla teoria dei controlli automatici ed alle sue applicazioni allo studio dell'organismo vivente, anche Craik è molto meno informazionistico e quasi per nulla interessato ai controlli mediante l'uso di calcolatori numerici. Questa impostazione ha indubbiamente il merito di attribuire maggiore enfasi di quanto non faccia la Cibernetica americana alla nozione di energia ed al rapporto tra servomeccanismi ed energia.

In *The Mechanism of Human Action* vengono sottolineati due aspetti caratteristici degli organismi viventi. Da un lato il fatto che quando sono opportunamente stimolati rilasciano in maniera controllata energia precedentemente accumulata da una fonte esterna; dall'altro il *feedback*. L'equilibrio dinamico che l'organismo deve avere con il proprio ambiente esterno per sopravvivere è assicurato da queste due caratteristiche.

Dal punto di vista termodinamico, ragiona Craik, l'organismo utilizza «a downhill reaction – such as the combustion of carbohydrates – to provide them with a store of energy by which to drive a few uphill reactions for their own benefit» [Craik 1966, p. 14]. Nel suo insieme la reazione mediamente è sempre in discesa, ma localmente è in salita. A ben vedere – considera Craik – l'uso che gli uomini fanno delle macchine estende, dal punto di vista della cultura, questa attitudine del vivente [ivi, p. 15].

I sensori rilevano la perturbazione ad un livello energetico basso. Craik abbozza una spiegazione in termini termodinamici:

«Clearly, if local uphill reactions are to occur, the Energy absorbed in liberating this energy must be small in comparison. The tissue must show ‘irritability’ or ‘trigger action’: a small disturbance must produce a large result» [ivi, p. 15].

Craik passa poi in rassegna diversi livelli a cui si può manifestare nel vivente l’irritabilità. Il modo più semplice è la tendenza a reagire dopo che è stato teso, ritraendosi con una forza maggiore, come dimostrato da Loeb (1900 e 1918). Un livello più elevato si ottiene con la specializzazione dell’organismo in organi sensoriali, organi di calcolo e organi effettori, e l’utilizzo di *feedback* negativo. Un livello ancora più elevato è quello che Craik considera un “*feedback* qualitativo” che potrebbe utilizzare un meccanismo simile al selettore dei centralini telefonici, sistema che potrebbe disporre di una varietà di risposte e selezionare quella opportuna al bisogno [cfr. ivi, pp. 16-18].

Come si vede ritroviamo qui quella concezione basata sulla distinzione tra sensori, che lavorano a bassi livelli energetici, ed attuatori che lavorano ad un alto livello energetico, cosa che costituisce un vero e proprio filo rosso nella riflessione Cibernetica americana, specialmente in Wiener. La specificità dell’esposizione di Craik è nel focalizzarsi maggiormente su questi fenomeni per tentare di trarne una teoria generale; d’altro canto la Cibernetica di Craik tende ad occuparsi in misura molto minore del calcolo digitale.

Il computer inglese

Questa scarsa (non assente) enfasi sul calcolo digitale da parte di Craik dipende molto probabilmente dal fatto che le ricerche sul computer in Inghilterra non si erano incrociate quasi per nulla con quelle sui controlli automatici. Abbiamo già avuto modo di vedere come l’Inghilterra avesse avuto un ruolo pionieristico nello sviluppo moderno del calcolo scientifico, ruolo che fu riconosciuto con l’elezione a presidente del Congresso sul calcolo automatico, tenutosi all’MIT e a Harvard dal 29 al 31 ottobre 1945, dell’astronomo Leslie J. Comrie (1893–1950), il quale negli anni Trenta al Nautical Almanac Office aveva introdotto l’uso delle calcolatrici numeriche commerciali per usi scientifici, che fu ripreso in grande stile negli Stati Uniti alla Columbia University e a Harvard. Abbiamo pure parlato delle attività svolte durante la guerra dall’Admiralty Computing Service (ACS), coordinato da John Todd, il matematico sotto le cui ali nel 1943 von Neumann aveva preso confidenza per la prima volta con i problemi numerici e computazionali [cfr. Todd e Sadler 1947]. Nel 1944 l’ACS conflui nella Divisione Matematica del National Physical Laboratory (NPL), con sede a Teddington, nei pressi di Londra [Hodges 1983, it p. 397]. Tale nuova istituzione rispondeva, questa volta per l’aspetto del calcolo scientifico, alle stesse esigenze di coordinamento istituzionale riscontrate nelle ricerche sui controlli automatici. L’NPL era diretto dal fisico Sir Charles Galton Darwin, nipote del grande teorico dell’evoluzione [cfr. Hodges 1983, it 398], ed al suo interno operava la Divisione Matematica di John Womersley;⁵²⁴ questa sua volta si articolava in cinque sezioni: una per il calcolo numerico, dove conflui l’ACS; una per le “schede perforate”; una per la “statistica”; una per lo sviluppo di un analizzatore differenziale sotto la direzione di Hartree, che però preferì lasciare la macchina collocata all’Università di Manchester; infine, nel giugno 1945 fu costituita una quinta sezione, comprendente inizialmente solo Alan Turing, che iniziò a lavorarvi dal mese di ottobre, fisicamente collocata a Cromer House, per sviluppare un calcolatore elettronico digitale *general purpose*, denominato Automatic Computing Engine (ACE) [cfr. Hodges 1983, it 411-2].

Nel dopoguerra nell’isola britannica furono avviati almeno tre progetti per calcolatori elettronici digitali “general purpose” a programma interno: l’ACE, l’EDSAC e il Manchester

⁵²⁴ Cfr. Annuncio del National Research Council, «Program Conference on Advanced Computation Techniques», Massachusetts Institute of Technology e Università di Harvard, 29-31 ottobre 1945.

Mark I. Essi erano tutti riconducibili al *First Draft* di von Neumann e al progetto dell'EDVAC praticamente sviluppato alla Moore School, sebbene non si possa negare - dove più, dove meno - l'impronta di una forte personalità scientifica come quella di Alan Turing, che aveva idee originali su come progettare un calcolatore, anche se riteneva impossibile prescindere completamente dal *First Draft*.

Queste macchine non si possono in nessun modo considerare come sviluppi del filone di ricerche su macchine digitali prima elettromeccaniche e poi elettroniche che prese piede in Inghilterra in ambito crittologico, anche se quelle esperienze favorirono certamente le competenze teoriche e ingegneristiche del personale. Gran parte del lavoro crittografico inglese era stato svolto dalla Government Code & Cipher School (GC&CS), specialmente a Bletchley Park, nei pressi di Londra.⁵²⁵ Qui in una prima fase Alan Turing creò la cosiddetta “Bombe navale”, un calcolatore elettromeccanico in grado di decifrare la macchina cifratrice “Enigma” della Marina tedesca.⁵²⁶ Dal novembre 1942 al marzo 1943, Turing fu a capo di una missione riservatissima che si recò negli Stati Uniti a Washington, Dayton e New York per uno scambio di competenze in crittoanalisi e crittografia.⁵²⁷ A Washington e Dayton Turing prese contatto con la linea di ricerca digitale che aveva preso avvio da Vannevar Bush, intorno ai progetti Memex, Rapid Arithmetical Machine e Rapid Selector, confluita nel sistema crittoanalitico per un “Comparator”, finanziato dall'OP-20-G, l'ufficio della US Navy per le comunicazioni segrete.⁵²⁸ Nel 1942 Desch iniziò ad occuparsi di una “Bombe” elettromeccanica, ed in seguito sviluppò un sistema crittoanalitico basato su tubi elettronici simile alla serie Colossus [cfr. Lee *et al.* 2000, p. 32]. È interessante notare comunque che – come dimostra il *Rapporto Pendergrass* [cfr. Burke 1994] – questa linea di ricerca, comunque legata a sistemi misti analogico-digitali, fu abbandonata nettamente in favore dell'approccio prospettato dal *First Draft* ed in generale dell'EDVAC. La cultura tecnologica accumulata fu tesaurizzata con la costituzione di una compagnia, la Engineering Research Associates (ERA) - poi incorporata dalla Remington Rand - che si occupò di computer [cfr. Lee *et al.* 2000, p. 32]. La stessa cosa accadde in Gran Bretagna. A Bletchley Park fu soprattutto Max Newman - il matematico che aveva incoraggiato Turing a pubblicare “On Computable Numbers” - ad occuparsi della costruzione di macchine elettroniche per la decrittazione, con l'ausilio tecnologico del Telecommunications Research Establishment, diretto da Charles Eryl Wynn-Williams, l'analogo inglese di Desch. Dopo una serie di macchine a contatori Robinson, nel dicembre 1943 furono realizzate macchine da 1.500 e 2.400 tubi elettronici denominate Colossus [cfr. Hodges 1983, it pp. 347-9 e 361]. Turing – per quel che se ne sa – non partecipò direttamente a questa fase di crittoanalisi elettronica: dal settembre 1943 risiedette a Hanslope, dove si occupò di una macchina per la crittazione della voce denominato Dalila [cfr. *ivi*, pp. 355-375] simile alla macchina crittografica della Signal Security Agency (SSA), la struttura crittologica dell'Esercito Statunitense, che si avvaleva prevalentemente dei servizi dei BTL.

⁵²⁵ Solo tra la fine degli anni Sessanta e la metà degli anni Settanta, il governo britannico ha permesso di parlare delle attività di Bletchley Park. Conseguenza dell'apertura britannica fu il volume Winterbotham (1974), seguito da Luebbert e Stoll (1977). Per quanto riguarda le attività crittologiche statunitensi durante la guerra, le cose sono andate anche peggio e fino alla metà degli anni Novanta se n'è saputo molto poco. Importanti pubblicazioni su questo argomento sono Burke (1994); Benson (1997) e Lee *et al.* (2000).

⁵²⁶ Cfr. Gladwin (1999); Budiansky (2000); Sebag-Montefiore (2000); Sale (2003); Copeland (2006).

⁵²⁷ Cfr. Gladwin (2003, p. 464) e Hodges (1983, pp. 243–252).

⁵²⁸ Cfr. Lee *et al.* (2000, p. 32) e Burke (1994). Vedi anche Memorandum from OP-20-GM-10 to OP-20-GM, “RAM-2, Improvements in Performance of”; Records of the Office of Naval Intelligence (ONI), Office of the Deputy Chief of Naval Operations, Record Group 38, citato da Gladwin (2003, p. 464); il rapporto “Machine Comparisons,” del Chief of Naval Operations, U.S. Naval Communications Washington, D.C., giugno 1946. citato da Burke (1994, p. 67), in cui si parla di un nuovo Film Comparator.

A fare la differenza fu indubbiamente l'apparizione nel panorama del calcolo del *First Draft* di von Neumann. Il programma della Divisione Matematica dell'NPL nell'ottobre 1944 prevedeva, tra le altre cose, l'«indagine sul possibile adattamento di apparecchiature telefoniche automatiche alle operazioni di calcolo scientifico» e lo «sviluppo di congegni per il conteggio elettronico adatti al calcolo rapido» [citato da Hodges 1983, it. p. 399]. Hodges afferma che «dietro queste parole si nascondeva la precisa volontà di imitare i progressi degli americani» [ivi]; ciò è vero, ma in un senso ancora anteriore alla rivoluzione del *First Draft*. Il primo punto poteva infatti esser riferito alle macchine a relè di Stibitz e della IBM; il secondo, col richiamo al “conteggio” elettronico, poteva far riferimento all'adattamento al calcolo della tecnologia delle macchine crittoanalitiche Colossus e, al massimo, faceva pensare a qualcosa di simile alla MIT Rapid Arithmetical Machine. Un rapporto di Womersley del dicembre 1944 riguardava ancora il progetto di un grande analizzatore differenziale e vi si discuteva l'aspetto dell'elettronica onde elevarne le prestazioni: si era dunque in linea con il Rockefeller Differential Analyser dell'MIT e in generale con l'indirizzo della sezione D2 e di Caldwell.

D'altro canto, nell'ottobre 1944 la rivoluzione del *First Draft* non era ancora esplosa, semplicemente perché non c'era. Va riconosciuto che Womersley fu un osservatore molto lungimirante di questa rivoluzione e questo molto probabilmente perché conosceva “On Computable Numbers” di Turing sin dagli anni Trenta, periodo in cui insieme ad un ingegnere aveva tentato senza successo di creare una macchina di Turing universale con elementi telefonici. All'inizio del 1945 si recò negli Stati Uniti per conoscere gli sviluppi delle macchine di calcolo e dopo una visita, sembra, all'Harvard Mark I, scrisse alla moglie di aver visto un “Turing in hardware”; poté anche vedere l'ENIAC ed essere informato del *First Draft*. Appena tornato in Inghilterra Womersley si incontrò con Turing per invitarlo ad unirsi all'NPL e gli mostrò una copia del *First Draft* [cfr. Hodges 1983, it. pp. 397-400]. Già alla fine del 1945 fu pronto un primo rapporto di Turing su un nuovo computer, presto ribattezzato ACE, dal titolo “Proposed Electronic Calculator” [cfr. *ivi*, nota 1, pp. 722-723; e p. 433]. Premettendo che il documento doveva essere letto in parallelo al *First Draft*, Turing riconosceva che non si poteva utilizzare la macchina universale di *On Computable Numbers* così com'era, in quanto in essa, per esempio, i dati erano immagazzinati linearmente [cfr. Hodges 1983, it. p. 414]. Occorreva dunque una macchina diversa, che facesse tesoro dell'architettura del *First Draft*. Tuttavia Turing proponeva per l'ACE un approccio che tendeva a diminuire il più possibile gli organi fisici previsti dal *First Draft*, sostituendoli con uno specifico programma, secondo l'indicazione di “On Computable Numbers” secondo cui una qualsiasi macchina di Turing particolare può essere rappresentata semplicemente da linee di codice impresse sul nastro di una macchina di Turing universale. Ne emerse un progetto originale rispetto all'EDVAC. Quando su suggerimento di Hartree, Maurice V. Wilkes propose per l'ACE un compromesso eccessivamente pendente per l'architettura americana, Turing scrisse a Womersley nel seguente modo:

«“il codice” che egli [Wilkes] suggerisce è contrarissimo alle linee di sviluppo che vengono seguite qui, e molto più vicino alla tradizione americana di risolvere le difficoltà servendosi di una grande quantità di apparecchiature in luogo del pensiero. [...] sono state omesse certe operazioni che noi consideriamo più fondamentali dell'addizione e della moltiplicazione» [Hodges 1983, it p. 457].

Sebbene in linea teorica Turing avesse ragione, egli trascurava il fatto che le macchine tendono ad adattarsi alla cultura tecnologica esistente. Di fatto in poco tempo l'architettura americana era divenuta lo standard di fatto e l'approccio minimalista seguito per l'ACE non poté che essere fortemente ridimensionato in tutti i progetti inglesi, compreso quello di Teddington. Nel frattempo erano stati avviati progetti per la realizzazione di computer in altri

due poli, nati nel periodo prebellico come centri di calcolo intorno ad analizzatori differenziali e che avevano svolto durante la guerra un importante lavoro computazionale: il Mark I dell'Università di Manchester, e l'EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator) del Mathematical Laboratory dell'Università di Cambridge.

Manchester divenne un polo di importanza essenziale perché fu lì che si decise di sviluppare i calcolatori per la ricerca nucleare [cfr. Hodges 1983, p. 510]. Vi andarono alcuni di coloro che avevano lavorato alle macchine Colossus. La direzione fu assegnata a Newman, che inizialmente pensava come von Neumann ad un computer come strumento euristico per la matematica pura, argomento sul quale i due iniziarono un carteggio all'inizio del 1946.⁵²⁹ A Manchester andarono anche i due ingegneri F. C. Williams e David Rees. Rees era reduce dalle ricerche a Bletchley nel gruppo di Newman ed aveva poi partecipato al corso estivo della Moore School del 1946.⁵³⁰ Williams, che aveva lavorato all'MIT Rad Lab [cfr Hodges 1983, p. 454], assicurò il successo del progetto con la realizzazione di memorie a raggi catodici. Nel 1948 Newman ottenne che anche Turing fosse cooptato nel progetto, affidandogli la vicedirezione. La struttura logica della macchina fu progettata da Newman ispirandosi al *First Draft*, ma anche ai rapporti di Turing sull'ACE e tenendo conto delle memorie a raggi catodici di Williams [cfr Hodges 1983, pp. 484, 488, 507].

La via inglese al computer passò, perciò, in gran parte per la recezione del *First Draft* e del lavoro condotto alla Moore School e allo IAS, che fu assicurata anche da numerosi viaggi in America. Nel settembre-ottobre 1945, Hartree e Comrie si erano recati alla Moore School, portando con loro due dei principali progettisti del Colossus, Flowers e Chandler. Alla fine di ottobre 1945 Comrie, Womersley e Hartree furono presenti al congresso sul calcolo automatico all'MIT e Harvard [cfr Hodges 1983, pp. 412]. Hartree fu invitato a soggiornare negli Stati Uniti anche nella primavera-estate del 1946 [cfr. Goldstine 1973, p. 246].⁵³¹ Turing, dal canto suo, si recò negli Stati Uniti solo nel gennaio 1947. L'occasione fu offerta dal Congresso che si tenne a Harvard dal 7 al 10 gennaio. Lo stesso che fu disertato da Wiener. Turing visitò inoltre la Moore School ed incontrò von Neumann e Goldstine a Princeton.⁵³² Nel suo rapporto circa il viaggio annotò che durante la visita non erano state reperite informazioni tecniche rilevanti, soprattutto perché nell'ultimo anno gli americani avevano informato gli inglesi su tutto; riteneva comunque che fra le varie squadre americane, il gruppo di Princeton fosse «quello con le idee più chiare e più lungimiranti, e quindi è quello col quale cercherò di mantenere i contatti». Annotava che negli Stati Uniti «il lavoro di ingegneria viene sempre fatto nello stesso edificio in cui si svolge quello più propriamente matematico», e questo era a suo parere il metodo giusto da seguire per l'ACE [cfr. Hodges 1983, it pp. 462-3]. Per capire quest'ultima frase occorre considerare che in Inghilterra la distanza che separava ingegneri e matematici era ancora più ampia di quella che abbiamo trovato negli Stati Uniti, tanto che matematici e ingegneri per lo stesso progetto tendevano a lavorare del tutto separatamente, spesso in istituzioni diverse.

In conclusione, quindi, negli Stati Uniti si era giunti alla rivoluzione del *First Draft* mediante un percorso originale, passato per la riflessione neurologica, mentre in Inghilterra si lavorò sui risultati americani, a parte le idee originali di Turing e senza voler sminuire le competenze degli ingegneri inglesi in elettronica, come dimostrò il successo delle memorie a raggi catodici di Williams, il cui lavoro arrivò a buon fine molto prima dei simili tentativi della RCA per l'IAS Computer di von Neumann.

⁵²⁹ Lettera di Newman a von Neumann dell'8 febbraio 1946, citata in Hodges it p. 443.

⁵³⁰ Cfr. Goldstine (1973, pp. 241 e 247) e Hodges (1983, it p. 443).

⁵³¹ Il quale rimanda ad una lettera di Goldstine a Hartree, 19 febbraio 1946.

⁵³² Cfr. Goldstine (1973, p. 218); Hodges (1983, it. p. 459).

Computer e neurologia in Inghilterra

Nel complesso, le ricerche inglesi per la realizzazione dei computer, almeno in questa prima fase, restarono dunque separate dall'ambito neurologico e psicologico, il quale si era invece ben integrato con le ricerche sui servomeccanismi.

Forse l'unico luogo in cui quest'altro fronte della sintesi Cibernetica avrebbe avuto la possibilità di attuarsi in maniera organica avrebbe potuto essere l'Università di Cambridge. Qui durante la guerra era stato attivo, accanto all'Applied Psychological Laboratory di Craik, il Mathematical Laboratory, imperniato intorno all'analizzatore differenziale sotto la direzione di John E. Lennard-Jones [cfr. Goldstine 1973, pp. 95-6]. Tale direzione passò poi sotto Wilkes nel 1945 [Hodges 1983, it p. 445]; nell'autunno 1946, Wilkes - dopo aver frequentato il corso sui computer del luglio-agosto 1946 organizzato dalla Moore School - vi avviò il progetto per l'EDSAC, che egli esplicitamente voleva fosse essere un EDVAC inglese [Hodges 1983, it 445 e 529]. Tuttavia Craik era ormai morto da più di un anno, e si comprende perché la sua "Cibernetica" fosse rimasta in gran parte analogica. Vi fu anche un'altra coincidenza che avrebbe potuto dare frutti cibernetici e non li diede. Infatti, mentre Wilkes lavorava all'EDSAC, Turing risiedette a Cambridge per tutto l'A.A. 1947/48, in un periodo in cui stava prendendo le distanze dall'ACE e prima di aderire alla squadra del Manchester Mark I. Tuttavia, incredibilmente, non ebbe rapporti né con Wilkes - le cui idee sui computer riteneva fossero troppo americane - né, per quel che ne so, con Barnett, nonostante fosse molto viva in Turing la voglia di occuparsi del nesso tra computer e neurofisiologia [cfr. Hodges 1983, it p. 481].

La congiunzione di controlli automatici, neurofisiologia e computer si ebbe in Inghilterra con la nascita di una vera e propria "Cibernetica inglese", senza negarne le peculiarità né le premesse già presenti nel contesto inglese, ancora una volta con la recezione di un altro parto americano, cioè la pubblicazione di *Cybernetics* di Norbert Wiener, che diede lo spunto per la creazione nel luglio 1949 di un gruppo informale, il Ratio Club [cfr. Holland e Husbands 2008, p. 91]. Questo gruppo di discussione iniziò a riunirsi mensilmente e non a caso alla prima riunione fu invitato Warren McCulloch [cfr. Hodges 1983, it. p. 535]. La sua composizione dimostra come l'integrazione tra le diverse anime della Cibernetica fosse presente nel Ratio Club, a cui parteciparono Alan Turing, ed alcune delle sue conoscenze del tempo di guerra come i matematici e crittoanalisti Jack Good e Robin Gandy, il fisico e poi esperto di teoria della comunicazione Donald Mackay, un matematico come Philip M. Woodward, insieme a neurologi come W. Grey Walter, Horace Barlow, George Dawson, lo psichiatra Ross Ashby, l'astronomo con interessi in zoologia Thomas Gold, insieme a psicologi che avevano già lavorato sul rapporto uomo/macchina come Albert Uttley, William E. Hick, e il neurofisiologo John Bates, per fare solo alcuni nomi [cfr. Holland e Husbands 2008, pp. 94-8].⁵³³

⁵³³ Per una ricognizione ancora più recente sul Ratio Club cfr. Holland e Husbands (2011).

Capitolo 12 – Cervello, computer, informazione

Wiener, l'Inghilterra ed il libro Cybernetics

L'itinerario che Wiener percorse nel suo viaggio inglese presso i centri di ricerca affini alla Cibernetica, alla luce di quanto abbiamo visto nel precedente capitolo, non poteva essere più indovinato. Egli ebbe «an excellent chance to meet most of those doing work on ultra-rapid computing machines, especially at Manchester and at the National Physical Laboratories at Teddington, and above all to talk over the fundamental ideas of cybernetics with Mr. Turing at Teddington» [Wiener 1948, p. 23]. Dalla conversazione con Turing, comprese – aggiunge nell'autobiografia, che egli «was making the same sort of synthesis between mathematical logic and electronics which Shannon had made in the United States» [Wiener 1956, p. 315]. Visitò anche lo Psychological Laboratory di Cambridge, dove ebbe uno scambio di idee con F. C. Bartlett ed i suoi collaboratori «on the human element in control processes» [Wiener 1948, p. 23]. Prese perciò contatto anche con l'ambito di ricerche di Kenneth Craik, morto due anni prima, dove si ricollegavano i controlli automatici con lo studio degli organismi. In generale Wiener si rese conto di come «the interest in cybernetics» fosse «as great and well informed in England as in the United States, and the engineering work excellent, though of course limited by the smaller funds available» [Wiener 1948, p. 23]. Tuttavia non trovò che fossero stati fatti progressi altrettanto significativi «in unifying the subject and in polling the various threads of research together as we had made at home in the States» [Wiener 1948, p. 23]. Nel dire questo probabilmente si riferiva alla mancata unificazione che abbiamo fatto notare nel capitolo precedente tra le ricerche inglesi sul computer e quelle di neurofisiologia.

Comunque l'esperienza fu sufficiente per rendersi conto dell'estensione geografica delle sue idee e della curvatura epocale di «these new technical developments» che «belong to the age» [Wiener 1948, p. 28], un'età che gli si presentava ora come del “controllo e della comunicazione nell'animale e nella macchina” per antonomasia. Come si è detto nel capitolo precedente, ciò che Wiener aveva visto in Inghilterra era almeno in parte frutto della disseminazione dei risultati dei cibernetici americani, specialmente del suo e di quello di von Neumann. Non sappiamo in che misura Wiener potesse averlo compreso. In ogni caso, fosse frutto di disseminazione o di lavoro autonomo (e di fatto di entrambe le cose intrecciate), ormai la Cibernetica non gli poteva apparire più come qualcosa di personalissimo, tanto che nell'autunno 1945, e poi ancora nel dicembre 1946, aveva pensato si trattasse di idee che poteva sopprimere. Osserva nell'autobiografia:

«after toying with the notion for some time, I came to the conclusion that this was impossible, for the ideas which I possessed belonged to the times rather than to myself. If I had been able to suppress every word of what I had done, they were bound to reappear in the work of other people, very possibly in a form in which the philosophic significance and the social dangers would be stressed less. I could not get off the back of this bronco, so there was nothing for me to do but to ride it» [Wiener 1956, p. 308].

Occorre anche considerare che quella che si apprestava di lì a qualche mese a battezzare come Cibernetica stava diventando già oggetto di roventi dibattiti. Nel gennaio 1947 era stato pubblicato sull'*Atlantic Monthly* l'articolo di Wiener “A Scientist Rebels”; inoltre sul finire del 1946 era montata in Inghilterra una *querelle* molto chiassosa sull'intelligenza dei computer. Se aggiungiamo a ciò le preoccupazioni di Wiener per una nuova rivoluzione industriale basata sull'avvento di fabbriche automatizzate tramite computer, che avrebbe potuto creare nuova disoccupazione, comprendiamo perché *Cybernetics* riferisca che i suoi amici inglesi J.B.S.

Haldane, H. Levy e John Desmond Bernal, tutti scienziati di sinistra attenti alle problematiche sociali della scienza, lo abbiano incoraggiato fortemente nello scrivere il libro commissionatogli in Francia, giudicando il nuovo campo «as one of the most urgent problems on the agenda of science and scientific philosophy» [Wiener 1948, p. 23].

La svolta di Cybernetics

Nella storia del “nuovo campo” la pubblicazione del libro *Cybernetics* produsse una netta svolta, come abbiamo già accennato circa le sue ripercussioni in Gran Bretagna, come la creazione del Ratio Club. Wiener vi raccolse tutte le idee che era andato sviluppando dal 1940 in poi, cioè dal *Memorandum sulle EDP* e dall’inizio delle ricerche sulla previsione e sul filtraggio, fino al momento in cui scriveva, l’estate 1947. Buttò giù il libro di corsa, com’era suo solito, scrivendolo nello spazio di un’estate o poco più, a Città del Messico, dove si trovava con Pitts e Rosenblueth nel quadro del contratto quinquennale di ricerca con la Rockefeller. Raccolse le sue idee a dire il vero in una maniera sostanzialmente impressionistica, anche se enormemente suggestiva, mettendo capitoli più matematici accanto ad altri più filosofici [cfr. Montagnini 2005, p. 205].

La cosa più importante di tutte nel libro è forse costituita dal titolo stesso, in quanto nello sceglierlo si diede finalmente un nome a questo campo che da tanto tempo ne aspettava uno. Scrive Wiener nell’introduzione:

«the group of scientists about Dr. Rosenblueth and myself had already become aware of the essential unity of *the set of problems centering about communication, control, and statistical mechanics, whether in the machine or in living tissue*. On the other hand, we were seriously hampered by the lack of unity of the literature concerning these problems, and by the absence of any common terminology, or even of a single name for the field. After much consideration, we have come to the conclusion that all the existing terminology has too heavy a bias to one side or another to serve the future development of the field as well as it should; and as happens so often to scientists, we have been forced to coin at least one artificial neo-Greek expression to fill the gap» [Wiener 1948, p. 11, il corsivo è mio].

Si noti l’espressione in corsivo. Come dimostra d’altro canto tutto il contenuto del libro e lo stesso sottotitolo, “Control and Communication in the Animal and the Machine”, senza ombra di dubbio con la parola “cybernetics” Wiener si apprestò a denominare quello che finora non solo lui, ma anche Rosenblueth, Pitts, McCulloch, von Neumann ed i corrispondenti di quest’ultimo nel periodo del Convegno di Princeton, avevano chiamato “the new field”. Si trattava del campo che a Wiener almeno dallo *Yellow peril* in poi era apparso come una “ingegneria” o una “teoria” generalizzata delle comunicazioni, includente oltre a telegrafia, radiotelegrafia e telefonia, anche lo studio dei controlli automatici e dei nascenti calcolatori elettronici digitali.

La parola “cybernetics” fu coniata con riferimento al termine greco *κυβερνήτης*, che vuol dire pilota;⁵³⁴ nell’introduzione Wiener aggiunge che nella scelta c’era anche l’intenzione di rendere omaggio a Maxwell, in quanto autore di “On Governors”, «the first significant paper on *feedback mechanisms*» [Wiener 1948, p. 11]. Si trattava dunque di una scienza che suonava come “controllotica” o qualcosa di simile, ed occorre riconoscere che l’aver tenuto conto soltanto dell’aspetto legato ai controlli non fu particolarmente felice, sebbene Wiener non

⁵³⁴ Wiener fece ciò evidentemente senza prendere in mano un vocabolario di greco, dove avrebbe scoperto che erano attestate sin dall’età classica espressioni come “κυβερνήτικὴ τέχνη” e “κυβερνήτικῃ”, che stavano non solo per l’arte del pilotare una nave, ma che già tendevano ad assumere il significato traslato di arte del governare lo Stato. Era stato in quest’ultimo senso politico che la parola era stata ripresa nel francese “cybernétique” da Ampère (1843, II parte, p. 141). Da notare come la radici greca “κυβερ-” e la latina “guber-” (di “gubernator”) derivino da un comune termine indoeuropeo che significa “timone”.

abbia mai ristretto la nozione di controllo all'ambito analogico. La scelta è stata probabilmente una delle cause che mise su una falsa pista molti contemporanei e non pochi interpreti posteriori, confermandoli nell'interpretazione della Cibernetica come una generalizzazione all'essere vivente della teoria dei controlli automatici [cfr. per es. Calimani e Lepschy 1990]. Nell'autobiografia Wiener confesserà, in effetti, che nello scegliere la parola la mente era andata inizialmente a qualcosa che avesse piuttosto attinenza con la comunicazione. L'unica parola però che gli veniva in mente per "messaggero" era "*anghelos*", che Wiener scartò per le connotazioni religiose [Wiener 1956, p. 322]. Scampato il pericolo di avere a che fare con un' "anghelotica", le generazioni successive hanno sentito l'esigenza di tener conto dell'aspetto informazionistico e informatico contenuto nella "cosa" che la Cibernetica voleva indicare, aspetto che è riemerso insistentemente, ad esempio, con l'introduzione in francese di "informatique" per tradurre l'inglese "computer science", e poi di "télématique";⁵³⁵ o più recentemente, in ambito accademico italiano, con le locuzioni "Scienze dell'informazione" o "Scienze e ingegneria dell'informazione";⁵³⁶ dalle cui estensioni semantiche però, rispetto alla Cibernetica originaria, si tende in genere ad escludere le neuroscienze.

Si fa però fatica a credere che la scelta sia stata solo frutto di una svista. Il "nuovo campo" sin dal 1945 aveva prodotto almeno due programmi di ricerca specifici: il computer di von Neumann e la ricerca biomatematica di Wiener e Rosenblueth; programmi che nel 1945 promettevano di integrarsi, ma che dal 1946 avevano assunto, anche ufficialmente, due collocazioni fisiche e amministrative distinte, uno allo IAS e l'altro tra MIT e Città del Messico. Le posizioni etico-politiche ed i gesti d'impulso di Wiener lo sottrassero *de facto* sempre più radicalmente alla progettazione di computer, nonché alla nascente missilistica, e lo portarono a considerare le ricerche con Rosenblueth come il rifugio presso un amico fidato, lontano dalla guerra. A ben vedere, la parola "cybernetics" sarebbe stata molto più adatta a battezzare lo specifico programma di ricerca con Rosenblueth, abbozzato in "Behavior, Purpose and Teleology", ed approfondito sperimentalmente con le ricerche sul cuore e sul clono muscolare. Tra l'altro fu proprio a Città del Messico che fu scelta e Wiener ci dice, distorcendo *pro domo sua* la storia, che il gruppo di Princeton si era raccolto intorno a lui e a Rosenblueth, conferendo così a quest'ultimo un ruolo eccessivo se si guarda al "nuovo campo" nella sua accezione più larga di Teoria delle comunicazioni generalizzata. Visto da quest'altra angolazione erano stati centrali nel *new field*, almeno quanto Rosenblueth se non più di lui, anche von Neumann, Bigelow, Pitts e McCulloch; come in Inghilterra Turing tanto quanto Craik.

Wiener d'altro canto non vuole rinunciare alla sua visione complessiva ed il libro rappresenta certamente la migliore fonte per comprenderla in tutta la sua larghezza. Esso costituisce senza dubbio, unitamente ad alcuni interessanti spunti contenuti nel successivo *The Human Use of Human Beings*, scritto nell'estate 1949, la punta più avanzata della riflessione Cibernetica fino ad allora, che va letta in parallelo alle coeve riflessioni di McCulloch, di von Neumann sulla Teoria degli Automi, ed a quelle di Turing sull'intelligenza dei computer.

⁵³⁵ Il termine "informatique" fu introdotto in francese nel 1962 dall'ingegnere Philippe Dreyfus, direttore del Centre de Calcul Électronique della Bull, come fusione di "information" e "automatique"; la parola è stata poi definita dall'Académie Française nel 1967 come "scienza del trattamento automatico dell'informazione". Più recente è il termine "télématique" - fusione di "télé" e "informatique" - introdotto da Simon Nora e Alain Minc nel rapporto sull'informatizzazione della società presentato nel gennaio 1978 al presidente francese Giscard d'Estaing [cfr. Nora e Minc 1978].

⁵³⁶ Ad esempio il Dipartimento di "Scienze dell'Informazione" dell'Università di Milano è nato nel 1986 dalla trasformazione dell'Istituto di Cibernetica (<http://www.dsi.unimi.it>); all'Università di Bologna la Scuola di Dottorato in "Scienze e Ingegneria dell'Informazione" riunisce 5 «Dottorati dell'Informazione che formano ricercatori in informatica, elettronica, telecomunicazioni, campi elettromagnetici, bioingegneria, automatica e ricerca operativa». (<http://www.unibo.it>)

Il cervello e il computer per Wiener

Rimandando ad altri lavori per quel che riguarda una lettura integrale di *Cybernetics*⁵³⁷, vorrei qui approfondire le riflessioni che il libro conduce sul cervello in parallelo al computer, per poi confrontarle con i punti di vista di von Neumann e di Turing sull'argomento.

Cybernetics dedica a tale tema ben tre capitoli: il 5°: "Computing Machines and the Nervous System; il 6°: "Gestalt and Universals" ed il 7°: "Cybernetics and Psychopathology".

Nel capitolo 5° Wiener discute delle macchine digitali. Esse sono da preferire a quelle analogiche nelle prestazioni ad alta precisione, in particolare con l'adozione del sistema di numerazione binaria. Dato che devono lavorare il più possibile senza l'intervento dell'operatore umano, che potrebbero rallentarne l'esecuzione, i dati devono essere inseriti prima della computazione ed insieme alle istruzioni per gestirli, «thus the computing machine must be a logical machine as well as an arithmetic machine and must combine contingencies in accordance with a systematic algorithm» [Wiener 1948, p. 118]. Il concetto di programma interno è dunque concepito da Wiener come un espediente suggerito per rispettare il prerequisito della velocità, ed è probabilmente in questo modo che egli potrebbe averlo suggerito nel 1944 a von Neumann. Dato che deve possedere internamente le istruzioni, egli vede il computer come una "macchina logica", in particolare utilizzando l'algebra booleana, che è ancora binaria e sfrutta la superiorità delle operazioni logiche binarie. Assume perciò un rilievo particolare l'uso di meccanismi a scatto elettromeccanici o elettronici. Nondimeno, egli trova particolarmente interessante il comportamento a tutto o niente dei neuroni del cervello umano e animale.

Wiener pensa che parte dell'informazione nervosa possa essere immagazzinata nella variazione delle permeabilità sinaptica [cfr. Wiener 1948, p. 130]. Perciò, in un periodo in cui non era ancora stata messa a punto la teoria dei neurotrasmettitori, egli non esclude che possano esservi altre «non-neuronic influences, perhaps of a humoral nature, which produce slow, secular changes tending to vary that pattern of incoming impulses which is adequate for firing» [ivi, p. 121]. Con riferimento alla teoria dei riflessi condizionati di Pavlov, introduce uno schema per cui certi comportamenti sono premiati o puniti mediante una modificazione del tono affettivo [affective tone], che può coincidere con messaggi del tipo "to whom it may concern", inviabili mediante altri canali meno costosi rispetto a quelli nervosi, che possono essere rappresentati da messaggi chimici come gli ormoni [cfr. ivi, 127-9]. Tale idea rimandava ad un suggerimento di Jerome Lettvin e Oliver Selfridge, e si basava su una riflessione relativa all'importanza che ha il sesso, e di conseguenza l'attività ormonale, nella memoria dell'individuo secondo le teorie freudiane [cfr. ivi, p. 130].

Wiener non esclude la possibilità di costruire analogamente delle reti in cui le soglie di polarizzazione dei triodi siano modificate nel corso dell'azione, anticipando così l'idea di realizzare applicazioni delle reti neuronali come il *Perceptron*.⁵³⁸

Rispetto alla considerazione del computer e del cervello come macchine logiche «the chief work is that of Turing», con riferimento a "On Computable Numbers" [Wiener 1948, pp. 124-5]. Però Wiener aggiunge che, in linea con il punto di vista operativistico della scienza moderna «the study of logic must reduce to the study of the logical machine, whether nervous or mechanical, with all its non-removable limitations and imperfections. [...] All logic is limited by the limitations of the human mind when it is engaged in that activity known as logical thinking» [ivi, p. 125].

⁵³⁷ Confronta in particolare il capitolo 7 "Cybernetics", del mio libro *Le Armonie del Disordine* [Montagnini 2005, pp. 201-236]

⁵³⁸ Sul "Perceptron" soprattutto Rosenblath (1962); un valido comment è in de Luca e Ricciardi (1986, pp. 403-440).

A questo livello abbiamo un ribaltamento del punto di vista consueto che vede il cervello umano come comunque superiore al computer. Per Wiener sono entrambi “macchine logiche” e perciò anche il cervello – in quanto macchina – va considerato come un elaboratore che tratta concetti in maniera finitistica [cfr. *ivi*, p. 125-6]. A questo riguardo il discorso di von Neumann, come vedremo tra poco, non sembra identico.

Poi Wiener passa discutere delle memorie. Ne sono necessarie diverse: una che lavori in maniera rapidissima e dove si possa scrivere, leggere e cancellare; un'altra permanente, che costituisca una sorta di schedario stabile. Viene richiamata qui una circostanza evocata durante il terzo convegno Macy nella discussione seguita alle relazioni di von Neumann sulle memorie nei calcolatori e dello psichiatra e psicanalista Nathan Ackerman (1908–1971), sulle memorie nella nevrosi [cfr. *McCulloch's Summary*, p. 8]. Era emerso che una probabile differenza tra computer e cervello poteva consistere nel fatto che il corso della vita può essere considerato come un'unica lunga computazione, senza che si abbia mai la possibilità di resettare e riavviare la computazione da capo. Questa caratteristica, secondo Wiener, ha conseguenze in psicopatologia [cfr. Wiener 1948, p. 121]. Egli ritiene inoltre che per le operazioni più frequenti siano da utilizzare organi specializzati, mentre per quelle più rare potrebbero essere assemblati dei “dispositivi” da attivare al momento in cui il problema specifico si presenta, e suggerisce l'esistenza di qualcosa di simile ad un selettore telefonico. Tale organo – si ricorderà – era stato immaginato anche da Craik, in vista di funzioni ripetitive rapide. Invece Wiener pensa ad esso in ordine a necessità di economia delle comunicazioni, per evitare problemi di traffico e di overloading nel sistema nervoso [cfr. *ivi*, p. 132]. Come Turing, egli considera possibile che una macchina apprenda [cfr. *ivi*, p. 126].

Il capitolo di *Cybernetics* su “Gestalt and Universals” si occupa della fisiologia della visione in relazione specialmente alla capacità di osservare invarianti trasformazionali, con alcune riflessioni sulla teoria matematica dei gruppi, alcune idee sui dispositivi tecnici per imitare il sistema fisiologico allo studio ed alcuni spunti provenienti dal neuro-anatomista von Bonin. Il capitolo rappresenta un esempio del tipo di ricerche cibernetiche pratiche che Wiener andava svolgendo, ed anche dello stretto rapporto di collaborazione che in questo periodo lo legava a McCulloch oltre che a Rosenblueth.

L'ultimo capitolo di *Cybernetics* in cui si tratta di cervello e computer è “Cybernetics and Psychopathology”. Il primo problema riguarda gli errori operativi. Egli immagina, con cautela, che qui giochi un importante ruolo la ripetizione ridondante delle procedure. Piuttosto interessante è la discussione delle psicopatologie che egli chiama “funzionali”, cioè non riconducibili ad un danno anatomico o ad una patologia della fisiologia dei tessuti interessati, come nelle malattie “organiche”. In un cervello adulto va considerata l'associazione tra le strutture cerebrali e «the instructions given it at the beginning of a chain of operations and with all the additional information stored and gained from outside in the course of this chain» [*ivi*, p. 146].

Giustamente Wiener considera che nel cervello, come nel computer, deve avere un ruolo estremamente significativo l'insieme delle istruzioni memorizzate nel corso del tempo. In proposito occorrerebbe chiedersi in che misura esistono anche delle istruzioni di lavoro non apprese, anche se su questo egli non è molto esplicito pur parlando di «instructions given it at the beginning».

I disturbi funzionali potrebbero essere dunque riconducibili secondo Wiener a disturbi della memoria. Wiener non pensa a disturbi nelle “linee di codice” ma a problemi di comunicazione delle informazioni nel sistema. Uno dei problemi potrebbe essere costituito dall'accumulo eccessivo delle informazioni memorizzate. In taluni casi «it is possible that the patient simply does not have the room, the sufficient number of neurons, to carry out his normal processes of

thought» [ivi, p. 147]. Certi disturbi inoltre possono intaccare i ricordi permanenti. Probabilmente il sonno serve alla cancellazione non patologica delle informazioni. La lobotomia cancella ricordi ma induce anche profonde menomazioni e Wiener è fortemente critico nei confronti di questa pratica. I diversi metodi per determinare degli shock, elettrici, insulinici ecc. sono meno invasivi della lobotomia, ma possono cancellare molti ricordi. Essi in ogni caso possono riguardare le memorie recenti, non quelle permanenti, ed in questo ambito lo strumento migliore sembra a Wiener la psicoterapia, che consente di accedere ai ricordi profondi. Certamente, nella misura in cui si riconosce una realtà ed una efficacia alle informazioni, un metodo in grado di modificare queste informazioni risulta il più efficace per migliorare quelle psicopatologie in cui si suppone un malfunzionamento della gestione delle informazioni.

Un ulteriore aspetto su cui Wiener si sofferma è la grandezza del cervello. Come è stato fatto notare tra gli altri da D'Arcy Thompson (1942), un sistema organizzato oltre una certa grandezza smette di funzionare o comunque manifesta problemi di funzionamento. Nel caso di una rete telefonica, secondo Wiener, uno dei fattori critici è dato dal tempo di attesa dell'abbonato prima di riuscire a parlare; a suo parere il cervello umano è costituito da una sistema di catene neuroniche molto lunghe, che lo rende piuttosto prossimo al livello critico, e gli ingorghi di traffico sono molto probabili.

In generale comunque Wiener è prudente, non identifica cervello e computer. Nel parlare dei malfunzionamenti del cervello, ha premura di avvertire che la teoria *a priori* del funzionamento del cervello, elaborata sulla base di un approccio comparativo con il computer, risulta ancora poco adeguata. Egli precisa che non si può attribuire ogni patologia ad un «defect in the organization of the brain as a computing machine. [...] Nevertheless, the realization that the brain and the computing machine have much in common may suggest new and valid approaches to psychopathology and even to psychiatrics» [Wiener 1948, p. 144]. Dunque non vuole considerare il cervello ed il computer come identici, ma come sistemi che hanno molti aspetti in comune.

Il cervello e il computer per Turing

Nella lettera a Wiener del 29 novembre 1946, von Neumann parla della «very un-neurological thesis of A. Turing».⁵³⁹ Che la tesi di Turing sia completamente non neurologica è vero fino ad un certo punto, in quanto, sebbene questi non avesse elaborato “On Computable Numbers” sulla base di una teoria architettureale del cervello, come invece avevano fatto Pitts e McCulloch, aveva però pensato ad un metodo per rappresentare un essere umano che calcola sulla base di procedure effettive. Egli riteneva, inoltre, che una macchina universale di Turing fosse in grado, qualora fornita delle opportune istruzioni, di assumere qualsiasi comportamento intelligente esprimibile da un essere umano, mediante regole generali esplicite.

Questo spiega perché piuttosto precocemente, come ribadisce il suo principale biografo Andrew Hodges, Turing abbia espresso a più riprese l'intenzione di “costruire un cervello”. All'inizio del 1943, durante il suo soggiorno americano per scopi crittologici, conversando con Shannon nella sede dei BTL a New York, gli aveva accennato del progetto di una macchina in grado di imparare [cfr. Hodges 1983, it. p. 346]. Qualche tempo dopo confidò a Donald Bayley, suo collaboratore nel progetto Dalila, che nel dopoguerra avrebbe voluto costruire “un cervello” [cfr. ivi, p. 379]. Anche la madre, nel 1944, lo sentì parlare del progetto di costruire un calcolatore universale inteso come un cervello, che potesse servire per studiare la psicologia

⁵³⁹ Lettera di von Neumann a Wiener, 29 Novembre 1946 (VNLC), General Correspondence, Box 7.

umana.⁵⁴⁰ Nel progettare infine l'ACE ebbe poi la viva convinzione di star lavorando alla costruzione di un "cervello elettronico".

Turing condivideva dunque l'assunto più caratteristico dei primi cibernetici, cioè il rifiuto della frattura ontologica cartesiana tra esseri umani e macchine, ed ancor più precisamente l'idea di una comparabilità, se non addirittura di una vera e propria equivalenza, tra macchine di Turing universali, cervelli e computer, sebbene pensasse che questa questione dovesse essere decisa più dall'esperienza che dalla teoria. Molto probabilmente fu sotto l'influenza di una conversazione con Turing che il 1° novembre 1946 un personaggio di spicco come Lord Mountbatten, presidente dell'Institution of Radio Engineers (IRE), aveva scritto sul *Times*:

«si sta considerando la possibilità di produrre un cervello elettronico, capace di eseguire funzioni analoghe a quelle svolte attualmente dalle parti semiautomatiche del cervello umano. [...] Sono già in uso macchine capaci di esercitare, in una certa misura, la propria memoria, e se ne stanno progettando altre che eserciteranno le prerogative fino a oggi esclusivamente umane della scelta e del giudizio. Una di esse sarà addirittura in grado di giocare una modesta partita a scacchi».⁵⁴¹

Il discorso è piuttosto interessante: una macchina come l'ACE poteva essere in grado di svolgere funzioni che sono già in qualche modo meccaniche nel cervello umano ed era già parzialmente in grado di apprendere, ma in futuro avrebbe potuto manifestare una certa capacità di giudicare. Seguirono diverse interviste a Turing. Il 7 novembre 1946 sul *Daily Telegraph* apparve un articolo basato su interviste a Hartree, Womersley e Turing dal titolo "L'Inghilterra farà un radio cervello". Tra l'altro vi si leggeva:

«Colui che ha concepito l'idea dell'ACE, il dottor Turing, ci ha detto che prevede il giorno – forse a 30 anni da oggi – in cui fare una domanda alla macchina sarà facile come farla a una persona».⁵⁴²

Nell'ambiente inglese queste idee incontrarono una strenua opposizione. Si ricordi che l'Inghilterra dell'empirismo di Locke è stata anche la terra di idealisti come Berkeley, che negava esistenza a tutto tranne che alle anime umane e a Dio, o Bradley (1902 e 1914), che giungeva a negarla alla realtà tutta, tranne che alla Divinità. Le affermazioni di Mountbatten scatenarono una polemica dai toni forti, con strascichi ancora attuali.⁵⁴³ Gli scienziati coinvolti nei progetti di calcolatori con compiti direttivi tesero a smussare le previsioni di Turing. Hartree sostenne che, da un lato, si trattava di sviluppi comunque relativi ad un futuro molto lontano, dall'altro che la meccanizzazione avrebbe riguardato sempre e soltanto gli aspetti appunto "meccanici" e "ripetitivi" dell'attività cerebrale; argomento questo ripreso alla fine del 1947 anche da Darwin, che spiegò:

«una grandissima parte del cervello è una macchina automatica che inconsciamente produce reazioni precise, e spesso molto complicate, agli stimoli ricevuti. È questa l'unica parte del cervello che possiamo sperare di imitare. In nessun modo le nuove macchine potranno sostituire il pensiero, al contrario, esse ne aumenteranno il bisogno» [Hodges 1983, it. p. 453].

L'argomento è estremamente interessante: nella misura in cui il cervello umano ha un comportamento ripetitivo è simulabile da un computer, altrimenti no. Turing non condivideva completamente questa convinzione. Però anche lui pensava che, nella misura in cui il computer fosse stato limitato a comportamenti "meccanici", sarebbe stato assimilabile alle parti più istintuali del cervello. Il 20 novembre 1946 aveva scritto al neurologo W. Ross Ashby:

⁵⁴⁰ Cfr. Hodges (1983, it. p. 384), che cita da Stoney Turing (1959).

⁵⁴¹ Lord Mountbatten, "Electronic Brain", in *Times* del 1° novembre 1943, citato da Hodges (1983, it. p. 451).

⁵⁴² Citato da Hodges (1983, it. p. 453).

⁵⁴³ Una importante discussione avvenne sul *British Journal for the Philosophy of Science*. Avviata in qualche modo da Popper (1950), fu proseguita da Wisdom (1951), il quale introdusse l'espressione "The Hypothesis of Cybernetics" che divenne il titolo generale di essa, da Polanyi (1952) e altri. Il libro Polanyi (1958) la riprenderà con riferimento esplicito a Turing.

«L'ACE, come lei suggerisce, verrà impiegato in prima istanza in un modo assolutamente disciplinato, e analogo all'azione dei centri più bassi, anche se i riflessi saranno estremamente complicati. A questa azione disciplinata si accompagna purtroppo la caratteristica negativa cui lei accenna, e cioè una totale mancanza di critica quando qualcosa va storto. Essa sarà inoltre necessariamente priva di qualsiasi originalità. Non vi è motivo, tuttavia, di usare sempre la macchina con queste modalità: non c'è nulla nella sua costruzione che ci obblighi a farlo».

Come sarebbe stato possibile per una macchina essere originale? Gli spiega:

«La macchina dovrebbe [...] avere la possibilità di sperimentare variazioni di comportamento, e di accettarle o rifiutarle nei modi da lei descritti. Io spero di ottenere appunto questo dalla macchina: la cosa è possibile perché, senza alterarne il disegno, almeno in teoria essa può essere usata come modello per qualsiasi altra macchina, facendole ricordare un opportuno gruppo di istruzioni. L'ACE è in effetti analogo alla "macchina universale" descritta nel mio lavoro sui numeri computabili» [citata da Hodges 1983, it. p. 467].

A questo livello si apre una questione teorica, in cui si è rimasti impantanati dall'epoca di "On Computable Numbers" in poi, cioè sulla possibilità di superare o no i limiti computazionali a cui è sottoposta la macchina di Turing universale. Personalmente vorrei far notare solo un aspetto. Quando Hilbert espone l'*Entscheidungsproblem* per il calcolo predicativo del primo ordine sembra che Hardy abbia esclamato:

«There is of course no such theorem, and this is very fortunate, since if there were we should have a mechanical set of rules for the solution of all mathematical problems, and our activities as mathematicians would come to an end» [citato da Davis 2000, p. 147].

Se ammettiamo che l'affermazione di Hardy sia stata confermata dalla dimostrazione di "On Computable Numbers" che l'*Entscheidungsproblem* non ha soluzione, non è lecito allora chiedersi mediante quali virtù il cervello del matematico riuscirebbe a risolvere problemi che una macchina di Turing non può risolvere? Non si tratta di una domanda retorica. L'assunto comune ai primi cibernetici che nega l'esistenza di differenze di principio tra macchine e organismi, e più specificamente tra computer e cervelli, conduce ad ipotesi che sono da sottoporre a prova sperimentale; lo stesso può valere per la tesi della "macchina intelligente".

Nel famoso articolo "Computing Machinery and Intelligence", dove propone il gioco dell'imitazione, Turing (1950) sostiene che non esiste alcuna prova che i problemi non computabili messi in luce da Gödel e da lui stesso si applichino soltanto ad una macchina di Turing universale, dunque ad un computer (con nastro infinito) e non anche all'intelletto umano. Ciò «has only been stated, without any sort of proof, that no such limitations apply to the human intellect» [Turing 1950, p. 451]. Aggiunge, però, di non volersi cavare d'impaccio così facilmente. Il suo punto di vista sembrerebbe soprattutto legato ad un approccio sperimentale. Come un giornalista riferiva il 9 novembre 1946, dopo averlo intervistato:

«Allora [...] abbiamo ricordato [a Turing] l'argomento che gli scacchi, e tutte le attività simili, richiedono oltre alla memoria una capacità di giudizio. Il dottor Turing ha detto di ritenere che questa materia riguardi più il filosofo che lo scienziato. "Ma – ha aggiunto – è una questione che, nel giro di un centinaio d'anni da oggi, potremo forse risolvere sperimentalmente"». ⁵⁴⁴

In tal senso il gioco dell'imitazione, noto come Test di Turing, potrebbe essere visto proprio come la possibilità di dimostrare sperimentalmente l'intelligenza della macchina. Un problema non teorico ma pratico, proprio nella misura in cui un computer è un sistema concreto, contingente e non puramente logico.

Vorrei far notare quali sono le somiglianze e le differenze con il modo di pensare di Wiener. Nella riflessione di quest'ultimo su cervello e computer prende rilievo l'informazione come grandezza costitutiva di entrambi i sistemi ed in grado di influenzarne il comportamento.

⁵⁴⁴ Surrent Comet, 9 novembre 1946. Citato da Hodges (1983, it. p. 453).

D'altro canto il modello a cui Wiener guarda è soprattutto quello di una rete telefonica. Il cervello a cui egli pensa è costituito comunque in gran parte di organi fisici, sebbene le informazioni siano vitali per il suo funzionamento.

Turing ha più chiaro di Wiener il ruolo delle linee di codice da inserire nelle memorie di un computer e sa, sulla base di "On Computable Numbers", che i programmi possono sostituire gli "organi" fisici di esso: è sufficiente che l'hardware costituisca una macchina di Turing universale e tutto il resto può essere formato da software. Questa considerazione, se riportata sul piano della neurologia (cosa che Turing effettivamente non fa), comporta alcune conseguenze a mio avviso interessanti. Ne discende innanzitutto un nuovo argomento "antineurologico" analogo a quello proposto da von Neumann nella lettera a Wiener del 29 novembre 1946,⁵⁴⁵ e forse anche più incisivo. La teoria neuronale diviene ancor più "sottodeterminata" per prevedere come sia costituito un cervello reale: esso può essere più o meno costituito da istruzioni o da "organi" fisici, con una discrezionalità davvero molto alta, una volta che sia garantito il minimo di complessità per così dire neuronale che permette ad esso di comportarsi come una macchina di Turing universale.

Ci rendiamo conto, inoltre, che la nozione stessa di memoria andrebbe riveduta. Ancora oggi le neuroscienze pensano al cervello animale in termini, se non di organi, certamente di qualcosa di materiale. Ma se nel cervello degli animali esiste software, innato o appreso, che presiede alla gestione della sua fisiologia e del suo comportamento, l'impostazione delle neuroscienze moderne così fiduciose del *neuroimaging* e simili apparirebbe come lo sforzo di chi volesse sapere come funziona un computer, senza preoccuparsi affatto del software registrato nelle sue memorie.

Il cervello e il computer per von Neumann

Delle idee su cervello e computer di von Neumann abbiamo già iniziato a parlare, fermandoci al 1947. Egli chiama "Teoria degli automi" la sua teoria del cervello e del computer, che dalla fine del 1946 include anche le cellule in quanto automi che si autoriproducono. La sintesi che scrivendo a Wiener nel 1946 aveva definito "Turing cum Pitts and McCulloch" e che lo aveva condotto ad identificare il cervello e il computer come delle macchine di Turing universali è definita in una conferenza come "Rigorous Theories of Control and Information". Ma questa sintesi non è soddisfacente. Deve essere integrata da quelle che egli chiama "Statistical Theories of Information". La ragione di questo ricorso è data da considerazioni relative all'affidabilità. L'esperienza concreta di costruzione di automi e lo studio del cervello mostrano che «their structure is controlled only partly by rigorous requirements and is controlled to a much larger extent by the manner in which they might fail and by the (more or less effective) precautionary measures which have been taken against their failure» [von Neumann 1966, p. 57]. La forma degli assiomi è probabilistica. Sono del tipo: se accadono A e B, allora accadranno con specifiche probabilità rispettivamente C, D, ecc. [cfr. *ivi*, p. 58].

Se confrontiamo questo punto di vista con quello di Wiener e Turing, ci troviamo ancora nello stesso clima di pensiero ma con sfumature diverse. Infatti a Wiener era stato sufficiente richiamare le limitazioni imposte dalle dimostrazioni di Gödel o di Turing per stabilire ciò che aveva sempre saputo, ovvero che la logica della macchina deve fare i conti con la contingenza della realtà. Von Neumann distingue tra approccio finitistico e problemi pratici. Dal suo punto di vista, una volta che si sia tenuto conto dei limiti alla computabilità, si è solo a metà dell'opera, in quanto occorre tenere ulteriormente conto degli accorgimenti che il progettista o

⁵⁴⁵ Cfr. la lettera di von Neumann a Wiener, 29 Novembre 1946 (VNLC), General Correspondence, Box 7 e la discussione che abbiamo già proposto *infra*, Capitolo 10.

la natura devono prendere perché il sistema, computer o cervello, funzioni. Turing, d'altro canto, considera utile dare alla macchina la possibilità di sbagliare per farne un sistema intelligente.

L'Informazione come grandezza nuova

È vero che, come già detto in un capitolo precedente, l'idea di Wiener di una quantità di informazione come entropia negativa non convince ed appare un azzardo da matematico. Tuttavia occorre rendersi conto che, nel corso della breve ed intensa storia della Prima Cibernetica, erano andati emergendo dei fenomeni che apparivano come imperniati in maniera essenziale intorno alla nozione di informazione, in quanto distinta dall'energia e dalla massa.

Con riferimento ai grandi computer del tempo ed al cervello, *Cybernetics* (1948) indica come non ci sia in alcun modo proporzionalità tra la potenza operativa di questi automi "informativi" e l'energia da essi utilizzata. Scrive:

«a large computing machine, whether in the form of mechanical or electric apparatus or in the form of the brain itself, uses up a considerable amount of power, all of which is wasted and dissipated in heat. The blood leaving the brain is a fraction of a degree warmer than that entering it. No other computing machine approaches the economy of energy of the brain. [...] Nevertheless, the energy spent per individual operation is almost vanishingly small, and does not even begin to form an adequate measure of the performance of the apparatus. [...] *Information is information, not matter or energy*. No materialism which does not admit this can survive at the present day» [Wiener 1948, p. 132. Il corsivo è mio].

Si tratta di un ragionamento di fronte al quale occorre togliersi il cappello, considerando che l'ENIAC assorbiva una potenza di almeno un centinaio di scaldabagno elettrici domestici, e che aveva una capacità di elaborazione infinitamente minore di quella di un nostro computer portatile, alimentato da una piccola batteria elettrica; ma Wiener poteva pensare anche ad un modello di computer imbattibile per efficienza energetica, cioè il cervello umano. Ritroviamo lo stesso tipo di ragionamento, reso più verificabile nell'epoca dei transistor, da parte di von Neumann:

«Finally, a comparison can be made with respect to energy consumption. An active logical organ does not, by its nature, do any work: the stimulated pulse that it produces need not have more energy than the prorated fraction of the pulses which stimulate it - and in any case there is no intrinsic and necessary relationship between these energies. Consequently, the energy involved is almost entirely dissipated, i.e. converted into heat without doing relevant mechanical work. Thus the energy consumed is actually energy dissipated, and one might as well talk about the energy dissipation of such organ.

The energy dissipation in the human central nervous system (in the brain) is of the order of 10 watts. Since, as pointed out above, the order of 10^{10} neurons are involved here, this means a dissipation of 10^{-9} watts per neuron. The typical dissipation of a vacuum tube is of the order of 5 to 10 watts. The typical dissipation of a transistor may be a little as 10^{-1} watts. Thus natural components lead the artificial ones with respect to dissipation by factors like 10^8 to 10^9 - the same factors above with respect to volume requirements» [von Neumann 1958, p. 49].

Come spiega von Neumann, un computer non compie lavoro come una macchina termica; perciò l'energia assorbita non costituisce nemmeno lontanamente un mezzo per misurarne la potenza di calcolo. Il territorio di fenomeni di cui si parla qui, con riferimento in ultima analisi alle reti logiche di relè o di dispositivi elettronici simulanti relè, ha a ben vedere costituito un filo rosso in tutta la nostra ricerca, rappresentato dai dispositivi attivi. Come scrive von Neumann, nel *First Draft*:

«There must, however, be no energy relation between the received and the emitted stimuli, that is, an element which has received one stimulus, must be able to emit several of the same

intensity. In other words: Being a relay, the element must receive its energy supply from another source than the incoming stimulus» [*First Draft*, p. 11].

È molto interessante notare che avevamo trovato tale aspetto anche in un ambito prevalentemente analogico nel trattare il *feedback*, parlando nel primo capitolo della versione originale del regolatore di Watt, poi modificata con l'introduzione di una fonte ausiliare di energia che aveva consentito l'allargamento del *range* di impiego e che aveva iniziato a evidenziare dal punto di vista teorico la differenza tra sensori e attuatori. Analoga situazione si era venuta a creare con l'introduzione dei servomeccanismi e poi degli amplificatori elettronici dotati di triodi e poi di transistor, i tipici elementi attivi dell'elettronica.

Abbiamo anche mostrato come tale aspetto sia stato molto rilevante nella riflessione di Craik, riguardo al fenomeno dell'irritabilità negli organismi, che egli coglieva come aspetto fondamentale che consente loro di sopravvivere e di andare in senso antientropico. Questo insieme di fenomeni, dunque, si ritrova sia in ambito analogico che digitale, sia nei sistemi naturali che in quelli artificiali. Su di esso si fonda la possibilità di una considerazione strettamente "informativa" di questi sistemi. Forse la sua teorizzazione più matura si trova in *The Human Use of Human Beings*, un libro peraltro più divulgativo di *Cybernetics* e principalmente dedicato all'impatto della Cibernetica sulla società, in cui Wiener introduce la distinzione tra accoppiamento energetico ["energy coupling"] e accoppiamento informativo ["informational coupling"]. Scrive:

«Two or more systems are said to be coupled if the laws of the motion of the larger system made up of all of them together cannot be stated as a collection of separate laws, each of which only involve an interchange of *energy* between the partial systems, in which case we shall call it an energetic coupling; or it might conceivably only involve an interchange of information between the subordinate systems, in which case we call it an *informational* coupling» [Wiener 1950, nota 1, p. 23].

La nozione di accoppiamento informativo sottintende che tra le parti del sistema vi possa essere uno scambio di informazione indipendente dalla quantità di energia impiegata per eseguirlo, almeno entro i limiti che, come suggerisce Wiener, vengono posti dalla meccanica quantistica. In termini classici, infatti, si potrebbe in teoria trasferire o manipolare informazione a livelli energetici bassi a piacere, mentre in termini quantistici ciò non è possibile [cfr. *ivi*, p. 24]. In *The Human Use of Human Beings*, Wiener non si interroga sulle ragioni dell'utilizzo dell'accoppiamento informativo in natura. Si sofferma piuttosto sul suo utilizzo nella tecnologia, ed in particolare spiega come esso renda possibile eseguire un processo di controllo o una elaborazione a livelli energetici bassissimi, per poi poter ritornare, mediante sistemi di amplificazione, ai livelli energetici della realtà quotidiana. Scrive:

«It is thus no longer necessary to control a process at high energy-levels by a mechanism in which the important details of control are carried out at these levels. It is quite possible to form a certain pattern of behavior response at levels even much lower than those found in usual radio sets, and then to employ a series of amplifying tubes to control by this apparatus a machine as heavy as a steel-rolling mill. The work of discriminating and of forming the pattern of behavior for this is done under conditions under which the power losses are insignificant, and yet the final employment of this discriminatory process is at arbitrarily high levels of power» [Wiener 1950, p. 173].

In *Cybernetics*, sebbene senza ancora l'esplicitazione dei concetti di accoppiamento informativo e accoppiamento energetico, lo stesso ordine di fenomeni è però applicato tenendo conto sia del versante tecnologico che di quello biologico. Leggiamo:

«In such a theory, we deal with automata effectively coupled to the external world, not merely by their energy flow, their metabolism, but also by a flow of impressions, of incoming messages, and of the actions of outgoing messages. The organs by which impressions are received are the

equivalents of the human and animal sense organs. They comprise photoelectric cells and other receptors for light; [...] and so on. The effectors may be electrical motors or solenoids or heating coils or other instruments of very diverse sorts. Between the receptor or sense organ and the effector stands an intermediate set of elements, whose function is to recombine the incoming impressions into such form as to produce a desired type of response in the effectors. The information fed into this central control system will very often contain information concerning the functioning of the effectors themselves. [...] Moreover, the information received by the automaton need not be used at once but may be delayed or stored so as to become available at some future time. This is the analogue of memory. [...]

To sum up: the many automata of the present age are coupled to the outside world both for the reception of impressions and for the performance of actions. They contain sense organs, effectors, and the equivalent of a nervous system to integrate the transfer of information from the one to the other. They lend themselves very well to description in physiological terms [Wiener 1948, pp. 42-43].

Poco prima Wiener aveva spiegato come l'organismo, dal punto di vista dell'elaborazione dell'informazione, non possa essere studiato in alcun modo come una macchina termica. Da questo territorio di fenomeni che si riscontra nell'organismo, e dal suo parallelo sia nel campo dei servomeccanismi che dei computer, emerge prepotentemente la necessità di adottare dunque un punto di vista nuovo, una teoria scientifica di base evidentemente non trattabile mediante la fisica della materia/energia, ed in cui debbono avere un ruolo distinto considerazioni comunicazionistiche e informazionistiche.

La Cibernetica fa così intravedere una teoria generale dei sistemi viventi e artificiali incentrata sulla creazione, distribuzione, trasformazione ed utilizzo dell'informazione. Ciò apriva la strada ad un nuovo modo di guardare agli esseri viventi, sotto il profilo dell'informazione. Dopo aver letto *Cybernetics* J.B.S. Haldane si affrettò a scrivere a Wiener:

«I am gradually learning to think in terms of messages and noise, [...] I suspect that a large amount of an animal or plant is redundant because it has to take some trouble to get accurately reproduced, and there is a lot of noise around. A mutation seems to be a bit of noise which gets incorporated into a message. If I could see heredity in terms of message and noise I could get somewhere».⁵⁴⁶

Come ha fatto notare Lily Kay (2000), la nascente biologia molecolare e la stessa scoperta del DNA, con la successiva determinazione del “codice genetico”, è certamente in debito verso questa nuova ottica introdotta dalla Cibernetica.

La riduzione della Cibernetica nell'alveo della razionalità strumentale

La Cibernetica intesa come una Teoria generale delle macchine informative, sia artificiali che biologiche, avrebbe richiesto probabilmente lo stesso clima intellettuale presente nell'Europa dell'Ottocento, da cui era nata la Termodinamica classica come teoria generale delle macchine termiche. A guardar bene, però, nemmeno Wiener aveva in mente un tale ideale epistemologico. La sua idea del procedere della scienza attendibile coincide in primo luogo con quella ricerca attenta e cauta che si esplica nelle minuziose ricerche sperimentali di Rosenblueth associate alle sue altrettanto scrupolose ricerche matematiche. *Cybernetics* di fatto fu il massimo che a questa teoria generale delle macchine informative è stato concesso: un affresco impressionistico che non ha avuto seguito. Più “generalista” di quello di Wiener dal punto di vista epistemologico è forse il tentativo di von Neumann, che cerca di costruire la sua Cibernetica come una Teoria degli automi, teoria di cui anche lui dà però solo abbozzi impressionistici per il futuro. Intitola un capitolo della sua conferenza sull'argomento tenuta all'Hixon Symposium: “The future logical theory of Automata” [von Neumann 1951, p. 15].

⁵⁴⁶ Lettera di Haldane a Wiener, 12 Novembre 1948 (WAMIT) Box 2.86, MC22. Citato da Kay (2000, p. 87)

Nel 1948, nel suo intervento all'Hixson Symposium von Neumann sottolinea la necessità di «a detailed, highly mathematical, and more specifically analytical, theory of automata and of information» [von Neumann 1951, p. 17].

C'è uno scarto rispetto alle teorie formali edificate nello spazio atemporale della logica. Ciò che accadrà, al contrario, alla Teoria degli automi nella conformazione che assumerà a partire dal volume *Automata Studies*, curato da Shannon e McCarthy (1956). Quest'ultimo sembrerebbe il tentativo di riportare questi studi nell'alveo di una formalizzazione pura, troncando di netto i nessi con gli studi neurologici, ma soprattutto confinandoli in uno spazio logico "sterilizzato". La teoria degli automi diventava uno strumento per la progettazione tecnica di calcolatori e si perdeva l'esigenza di farne una teoria scientifica, finalizzata cioè alla comprensione e alla spiegazione della realtà. La stessa tendenza dovrebbe aver seguito l'approccio dell'IA. I cibernetici erano interessati all'intelligenza artificiale perché vi vedevano comunque un possibile strumento interpretativo per spiegare l'intelligenza naturale, secondo quel ritmo bidirezionale di cui si è già parlato. Lo stesso Turing pensava più o meno così. Ma l'IA cercava uno spazio in cui si potesse prescindere del tutto dallo studio dei cervelli reali. La bilancia tra un approccio ingegneristico ed un approccio teoretico in entrambi in casi pendette di nuovo dalla parte dell'ingegnere, ingegnerizzando in qualche modo anche gli scienziati.

L'epilogo della Cibernetica

Tale situazione fu sostanzialmente facilitata da un clima psicologico sempre più difficile vissuto dai cibernetici. E d'altronde, quando un gruppo diviene isolato, è piuttosto normale che sia soggetto a crescenti tensioni interne. Dopo *Cybernetics* e sicuramente dopo *The Human Use of Human Beings* (1950), l'impegno teorico di Wiener si depotenziò. Egli, piuttosto isolato, scelse per sé il ruolo di profeta della società dell'informazione, di intellettuale che mette in guardia sui pericoli che il computer e i robot comportano; richiedendo una scienza etica, interdisciplinare, responsabile, svincolata dalle esigenze del profitto e non orientata alla guerra. Non abbandonò la ricerca attiva. Mantenne uno spiccato interesse per i temi biomatematici applicati alla medicina, e bionici, in particolare per le protesi di arti e organi sensoriali, e fu ben consapevole dei nuovi approcci che presto saranno introdotti nella teoria dei controlli automatici, dove i filtri di Wiener lasceranno il posto a quelli di Karman. Si mantenne anche ben informato sugli sviluppi dell'intelligenza artificiale. Tuttavia non si cimentò più nella riflessione circa i nodi teorici fondamentali della Cibernetica, o Teoria degli automi, come preferiva chiamarla von Neumann. Uno degli esempi più emblematici è costituito dall'atteggiamento che assunse rispetto alla nozione di informazione, tema sul quale nel 1962 fu organizzato un convegno in Francia (*Le concept d'information dans la science contemporaine*). Tradendo le attese del lettore degli atti, Wiener tralascia completamente il tema del convegno, presentando una relazione su *L'homme et la machine* [Wiener 1965a], dove discute delle prime esperienze di intelligenza artificiale, in particolare delle macchine in grado di apprendere, e prende spunto da ciò per parlare delle proprie idee sulle protesi e per criticare la tentazione di delegare alle macchine e a metodi di scelta razionale semplificati, specialmente nell'ambito della strategia militare, la complessa capacità umana di esprimere giudizi di valore e di riflettere sui significati e sugli scopi.

La riflessione di von Neumann sulla Teoria degli Automi non si arrestò, anche se il tempo per la riflessione teorica fu sempre più ridotto a causa dei mille impegni di consulenza in progetti per i computer o specifiche computazioni; ebbe anche incarichi diretti nell'amministrazione della scienza americana della Guerra fredda, fu consulente della Rand Corporation, *think tank* dell'Air Force, uno dei principali centri di ricerca sulle strategie militari, nonché della National Security Agency, fino a divenire uno dei cinque membri della

potentissima Atomic Energy Commission, incaricata di sviluppare le politiche per le ricerche e le applicazioni dell'energia nucleare in ambito civile e militare. Ciò che più mancò alla Cibernetica dopo il 1950 fu la comunicazione creativa tra le personalità di genio che avevano contribuito alla sua ideazione. L'ultima lettera tra von Neumann e Wiener sembra essere del 1949: continuarono entrambi a far parte del gruppo delle Macy Conference on Cybernetics. Tuttavia von Neumann fu assente al sesto convegno, nel 1949, e presente solo al settimo nel 1950, mentre Wiener fu presente in entrambi. Sia Wiener che von Neumann furono poi assenti all'ottavo incontro, del 1951, e furono cancellati dalla lista dei membri effettivi negli ultimi due del 1951 e 1953. I rapporti tra loro si erano probabilmente estinti quando nel 1955 von Neumann scoprì di avere un devastante tumore osseo. La morte lo colse l'8 febbraio 1957, alle prese con il manoscritto non finito di *The computer and the brain*.

Alla fine del rapporto tra Wiener e von Neumann si aggiunse poco dopo l'ulteriore crisi del rapporto tra Wiener e McCulloch, Pitts e Lettvin. Nel 1951, secondo quanto ha raccontato Lettvin, su raccomandazione dello stesso Wiener, l'MIT Research Laboratory of Electronics, diretto da Jerome Wiesner, aveva assunto nella veste di fisiologi esperti del sistema nervoso sia McCulloch, che lasciò la sua sede presso l'Università dell'Illinois, che Pitts e Lettvin [Cfr. Anderson e Rosenfeld 2000, pp. 8-9]. Questa fase avrebbe potuto preludere ad una promettente continuazione delle ricerche cibernetiche, che di fatto proseguirono all'RLE da parte di McCulloch, Pitts, Lettvin, Maturana e altri, come dimostra l'articolo divenuto classico come "What the frog's eye tells the frog's brain" [Lettvin *et al.* 1959]. Tuttavia si verificò una rottura tra Wiener ed i nuovi arrivati all'MIT, con una mai del tutto chiarita implicazione della famiglia di Wiener [Anderson e Rosenfeld 2000, p. 9]. In quell'occasione Pitts diede fuoco alla sua tesi di *Ph.D.* sulle proprietà delle rete neurali connesse su tre dimensioni, straordinaria dal punto di vista matematico. Nonostante il forte incoraggiamento da parte di Jerome Wiesner, Lettvin riuscì a salvare solo brandelli del lavoro. Ciò che, però, andò davvero in fumo in maniera irreparabile fu la voglia di continuare a far ricerca da parte di Pitts, il più stretto collaboratore di Wiener per più di un lustro. Commenta Lettvin:

«Wiener was what Walter never had, a father figure, and that threw Walter into a decline from which there was no pulling out. [...] He became more and more introverted. It was difficult to find him. He would try to escape from all his friends. We'd go hunting for him night after night» [Anderson e Rosenfeld 2000, p. 9].

Il colpo deve essere stato molto duro anche per McCulloch, nelle pagine del quale traspare fino alla morte un'autentica venerazione per Wiener. Tuttavia la rottura di Wiener con McCulloch e Pitts fu ancora più netta che quella con von Neumann, che nell'autobiografia del 1956, anche se raramente, viene almeno citato con rispetto; al contrario, il nome di Pitts e di McCulloch è sistematicamente omesso, senza che vengano risparmiati giudizi durissimi verso il comportamento scapigliato di una figura di giovane scienziato che non può che coincidere con la persona di Pitts. Questi attriti erano ancora percepibili all'inizio degli anni Sessanta, quando Giacomo Della Riccia, che fu poi l'ultimo assistente di Wiener, incontrò Wiener e McCulloch per la prima volta a Napoli, invitati alla scuola di Cibernetica di Eduardo R. Caianiello, il quale fu molto probabilmente l'erede più autentico della Cibernetica.⁵⁴⁷

Questo progressiva estenuazione psicologica della Cibernetica sarà ben riassunta da Wiener nelle seguenti parole:

«I had hopes that this new science was going to pass through a rapid development over a broad front. The subject has developed greatly, and I have participated in its later phases. However the times were not favorable for the normal growth of new ideas, [...]» [Wiener 1956, p. 270].

⁵⁴⁷ Comunicazione personale all'autore da parte di Giacomo Della Riccia.

CONCLUSIONI

Vorrei brevemente articolare le conclusioni del nostro lungo percorso su due piani, uno di epistemologia e sociologia della scoperta, l'altro relativo ai contenuti scientifici, che tratterò più o meno congiuntamente. Naturalmente non si pretende di giungere ad asserzioni definitive e perentorie, quanto piuttosto ad indicazioni da intendere come ipotesi di lavoro da sottoporre ad ulteriori approfondimenti e verifiche.

Cos'è la Cibernetica?

La Cibernetica si potrebbe considerare come uno dei tentativi di affrontare lo studio dei sistemi organizzati naturali e artificiali, con delle sue peculiarità ben determinate. L'idea di una tale scienza generale precede certamente la Cibernetica. Fritjof Capra (1996) ha indicato nella Tectologia del medico, economista e filosofo russo Alexandr Bogdanov (1873–1928) il primo tentativo di una tale scienza dei sistemi organizzati [cfr. *ivi*, pp. 56–59]. Ritroviamo la stessa esigenza, negli stessi anni in cui emerge la Cibernetica, nella Teoria generale dei sistemi di Ludwig von Bertalanffy. La Prima Cibernetica in quanto tale, secondo la delimitazione geografico-cronologica che abbiamo dato di essa nell'introduzione, non ha mai però a dire il vero tematizzato in maniera chiara l'obiettivo di costruire una tale scienza. Nella storia della Prima Cibernetica l'idea rispunta qua e là in maniera occasionale. Ne parlano una volta l'enigmatico corrispondente di von Neumann, Ortway,⁵⁴⁸ un'altra volta Wiener nell'autobiografia [cfr. Wiener 1956, p. 322]; ed ancora von Neumann in una recensione di *Cybernetics*, in cui si legge:

«The author is one of the protagonists of the proposition that science as well as technology, will in the near and in the farther future increasingly turn from problems of intensity, substance, and energy, to problems of structure, organization, information, and control. Any statement of this kind and generality is risky, inviting—and not quite innocently inviting—misinterpretation, and of dubious value outside of its technical context. It may, nevertheless, be important and valuable, if its true context exists and if it has a background of fruitful ideas. The reviewer believes that this context, this background of ideas, indeed exists in the case under consideration. Wiener's book constitutes an important systematic effort at exhibiting this context».⁵⁴⁹

In ogni caso i protagonisti della Prima Cibernetica non hanno mai preso di petto esplicitamente tale punto di vista, che forse potrebbe essere considerato come il punto di vista più ampio per la costruzione di una teoria da cui discendano anche gli specifici temi e problemi ad essa cari.

La questione dell'organizzazione sarà presa maggiormente a cuore dalla seconda generazione di cibernetici, che si raccolse intorno a von Föster, con riguardo al tema dell'auto-organizzazione, in un quadro teorico in cui si prendeva sempre più coscienza dell'importanza dei processi non lineari e della termodinamica lontana dall'equilibrio.

La Prima Cibernetica ha certamente anche assonanze con gli approcci scientifici organicistici, olistico-relazionali, come la fisiologia di Lawrence Henderson o l'ecologia

⁵⁴⁸ Lettera di Ortway a von Neumann, 16 febbraio 1941, citata da Nagy *et al.* (1989, p. 187).

⁵⁴⁹ Von Neumann, recensione di *Cybernetics*, *Physics Today*, maggio 1949, pp. 33–4.

scientifica, che riprendono istanze che risalgono alla fine del Settecento. Lavoisier (1743–1794) per esempio vedeva nel corpo umano la concorrenza di diversi “regolatori”. Egli scriveva:

«la machine animale est principalement gouvernée par trois régulateurs principaux. La respiration, qui consomme de l’hydrogène et du carbone et qui fournit du calorique; la transpiration, qui augmente ou qui diminue, suivant qu’il est nécessaire d’emporter plus ou moins de calorique; enfin la digestion, qui rend au sang ce qu’il perd par la respiration et la transpiration» [Seguin e Lavoisier 1789, p. 185].

E sempre Lavoisier, poco prima di essere ghigliottinato da una Rivoluzione francese ormai completamente impazzita, propose un tema di ricerca che riguardava una visione organica di quella che in seguito sarebbe stata chiamata biosfera. Ecco il suo quesito per il *Prix proposé par l’Académie des Sciences pour l’année 1794*:

«Les végétaux puisent dans l’air qui les environne, dans l’eau et en général dans le règne minéral, les matériaux nécessaires à leur organisation. Les animaux se nourrissent ou de végétaux, ou d’autres animaux, qui ont été eux-mêmes nourris de végétaux; en sorte que les matériaux dont ils sont formés sont toujours, en dernier résultat, tirés de l’air ou du règne minéral. Enfin la fermentation, la putréfaction et la combustion rendent continuellement à l’air de l’atmosphère et au règne minéral les principes que les végétaux et les animaux en ont empruntés. Par quels procédés la nature opère-t-elle cette circulation entre les trois règnes? Comment parvient-elle à former des substances fermentescibles, combustibles (2) et putrescibles, avec des matériaux qui n’avaient aucune de ces propriétés?» [Lavoisier 1794].

Se si considera la Cibernetica come teoria generale dell’organizzazione o come una teoria della regolazione automatica, sarebbe giustificata la «sensation de *déjà vu*» descritta dal neurofisiologo olandese Verveen (1969, p. 24) di fronte ad essa.⁵⁵⁰ Ma la Cibernetica non fu questo. La storia della Prima Cibernetica si intreccia effettivamente con la sintesi che condusse alla creazione della cosiddetta Teoria classica dei controlli automatici, una teoria cioè in cui l’approccio frequentistico sviluppato nell’ambito dell’elettronica degli amplificatori a *feedback* negativo (conosciuti in Italia come amplificatori “reazionati”) fu felicemente esteso alla trattazione dei dispositivi di controllo automatico e dei servomeccanismi, principalmente nel caso lineare. Tuttavia la Cibernetica non può essere concepita come una teoria generalizzata del *feedback*, né come una sua estensione al mondo del vivente, nemmeno se si resta alle interpretazioni wieneriane di cosa essa sia.

La Cibernetica trova la sua specificità come primo tentativo di trattare in maniera organica quell’ampio insieme di sistemi organizzati, interpretabili come “communication machines”, per dirla con Wiener, espressione nella quale egli include non solo i classici sistemi di comunicazione come il telefono o il telegrafo, ma anche quelli di controllo automatico sia analogico che digitale, ed i calcolatori, sia analogici che digitali.

Nel precedente capitolo abbiamo già indicato come, lungo tutta la nostra ricostruzione, compaia in maniera insistente un insieme di fenomenologie che si raggruppa intorno al concetto di elementi attivi. Esso offre una base per considerare la nozione di informazione in una maniera elementare, per così dire pre-umana, desoggettivizzata, una tipologia di fenomeni che precedono l’accezione umana di informazione, la quale inevitabilmente ci conduce ad invischiarci nel territorio della semantica. Sulla nozione di elemento attivo riposa l’idea wieneriana di accoppiamento informativo, cioè di una interazione tra sistemi in cui il contributo energetico, entro i limiti quantistici, può essere minimizzato a piacere, mentre le possibilità di interazione informativa restano intatte; la possibilità stessa di costituire reti

⁵⁵⁰ Verveen sviluppava alcune considerazioni già in Adolph (1961).

logiche e la trasmissione del segnale nervoso; nonché tutte le riflessioni di Craik sull'irritabilità dei tessuti viventi, ecc.

All'incirca si può dire che, se la termodinamica classica è stata una teoria per comprendere e razionalizzare la progettazione delle macchine termiche, macchine a cui si era inizialmente pervenuti per vie artigianali, così la Prima Cibernetica è stata il tentativo di costituire una teoria per la comprensione e la razionalizzazione dei dispositivi che trattano messaggi. Tale operazione, in parte riuscita, sebbene solo per regioni specifiche di fenomeni (si pensi alla teoria dei segnali, alla teoria dei controlli automatici, ma anche alla stessa scienza dei calcolatori), è però parzialmente pervenuta al suo obiettivo nella sua generalità, perché è mancata una chiara comprensione della nozione di messaggio.

Sarebbe forse possibile giungere ad una tale "scienza dell'informazione", come dicevo, attraverso una desoggettivizzazione della nozione di informazione, come pure di quella di memoria e di intelligenza, per molti versi come accadde ai concetti di lavoro e di temperatura nella termodinamica classica: una operazione in questo caso fortemente contro intuitiva, visto che memoria, intelligenza e informazione sono da noi vissute come le più tipiche dell'umano.

È bene, inoltre, fermarsi al semplice parallelo con la termodinamica classica, perché portare la Cibernetica quasi a coincidere con la termodinamica statistica *à la* Gibbs, come propose di fare Wiener, è un tentativo ancora *sub judice*, nonostante le suggestive analogie da lui individuate, che vanno oltre la somiglianza della formula con cui si definisce la quantità di informazione nella teoria di Shannon-Wiener con quella dell'entropia nella meccanica statistica; si pensi, per esempio, al principio, ribadito da Wiener, secondo cui le operazioni (trasmissione, previsione, filtraggio ecc.) a cui un messaggio può essere sottoposto possono lasciare inalterata o far decrescere la sua quantità di informazione ma mai incrementarla.

Come la termodinamica classica è servita a sua volta a migliorare le macchine termiche da cui aveva preso l'avvio, così la Cibernetica diventa anche una teoria per la sintesi ottima dei sistemi di comunicazione. Anche la prima, tra l'altro, si è intrecciata sin dall'inizio con lo studio degli organismi viventi intesi come macchine termiche. È interessante notare come le stesse ricerche di Julius Mayer, medico e fisico, che condussero all'enunciazione del principio di equivalenza tra energia termica ed energia meccanica, partirono da considerazioni fisiologiche. In seguito la termodinamica classica spinse i fisiologi a trattare gli organismi viventi come sistemi in grado di elaborare e trasformare energia, come nota Wiener. In maniera parallela la Cibernetica ha usufruito di molte intuizioni dei neurofisiologi e si è rivelata come una teoria utile allo studio dell'organismo vivente colto sotto il profilo della sua capacità di produrre, elaborare, scambiare, utilizzare informazioni.

Lo studio comparativo di animali e macchine

Lo studio in parallelo di macchine e organismi è peculiare, ma non esclusivo,⁵⁵¹ alla Prima Cibernetica, che nella fase della sua maturità - cioè negli anni del dopoguerra immediatamente precedenti e successivi alla pubblicazione di *Cybernetics* (1948) - tese prevalentemente a focalizzarsi sul nesso computer/sistema nervoso centrale. Nonostante i suoi dubbi, von Neumann non rinunciò mai all'aspetto più "difficile" delle ricerche sulla sua teoria degli Automi, cioè allo studio del sistema nervoso centrale. Scriverà:

«The formalistic study of automata is a subject lying in the intermediate area between logics, communication theory, and *physiology*. It implies abstractions that make it an imperfect entity when viewed exclusively from the point of view of any one of the three above disciplines — *the imperfection being probably worst in the last mentioned instance*. Nevertheless an assimilation of

⁵⁵¹ Cfr. soprattutto il lavoro di Cordeschi (2002), per l'approfondita descrizione della lunga storia del "robot approach".

certain viewpoints from each one of these three disciplines seems to be necessary for a proper approach to that theory. Hence it will have to be viewed synoptically, from the combined point of view of all three, and will probably, in the end, be best regarded as a separate discipline in its own right» [von Neumann 1966, p. 91. Il corsivo è mio].

Come si vede, per von Neumann, una teoria formale degli automi (che secondo Burks, il curatore del testo ed anche secondo me, coincide con la Cibernetica di Wiener) richiede di non prescindere dalla teoria della comunicazione, che qui ha un significato non lontano da quello che gli attribuisce Wiener, ma anche dalla neurofisiologia.

Questo parallelo tra cervello e macchine va inteso come un metodo comparativo, ma non va confuso con un uso semplicemente metaforico. Per i cibernetici il computer non è una metafora del cervello, né il cervello è una metafora del computer. Probabilmente, ci avvicineremmo di più ad una comprensione della natura di questo approccio pensando al metodo comparativo degli zoologi, in uso già all'epoca di Aristotele, oppure tra medici e fisiologi, quando usano il fegato di un maiale o il cervello di uno scimpanzé come "modelli materiali" per studiare quello dell'uomo. Nel fare ciò si è consapevoli che vi sono differenze tra gli organi degli animali e i corrispondenti nell'uomo, ma si sa anche che vi sono molte identità. Allo stesso modo si è fatto con le macchine: Wiener, von Neumann, Turing e gli altri sapevano che un computer è diverso dal cervello di un animale e da quello dell'uomo, ma che si poteva vedere comunque come un cervello. Scrive von Neumann:

«Natural organisms are, as a rule, much more complicated and subtle, and therefore much less well understood in detail, than artificial automata. Nevertheless, some regularities which we observe in the organization of the former may be quite instructive in our thinking and planning the latter; and conversely, a good deal of our experiences and difficulties with our artificial automata can be to some extent projected on our interpretations of natural organisms» [von Neumann 1951, pp. 1-2].

Questo conduce a quello che ho provato a definire un metodo per produrre ipotesi falsificabili per identità e differenze [cfr. Montagnini 2010]. Metodo comparativo che si ritrova anche in "Behavior, Purpose and Teleology" ed in generale in tutti i lavori dei protagonisti della Prima Cibernetica. È difficile dare una risposta alla domanda sul perché l'approccio cibernetico abbia ceduto il posto a quello dell'IA, che programmaticamente voleva trovare metodi computazionali per giungere agli stessi risultati intelligenti a cui sarebbe giunto un uomo, senza preoccuparsi del modo in cui il cervello umano vi giunge. Non voglio entrare nel merito della questione se questa scelta sia felice o meno. Probabilmente era e resta comunque una strada interessante da percorrere. Quel che è certo è che il passaggio dalla Cibernetica all'IA coincise anche con l'abbandono del metodo comparativo cibernetico. Dal punto di vista dei cibernetici, tra l'altro l'IA apparteneva legittimamente al campo cibernetico; nel senso che la scoperta di metodi nuovi per risolvere problemi al calcolatore poteva costituire una ipotesi da verificare per la comprensione dei metodi risolutivi umani. Per i fautori dell'IA, invece, fare questo ulteriore passaggio sarebbe stato un'inutile zavorra.

L'abbandono dell'approccio comparativo con il calcolatore si verificò d'altro canto anche sul fronte di quelle che oggi chiamiamo neuroscienze e probabilmente per esse l'abbandono fu ancor più deleterio. Nel corso della ricerca ho maturato la sensazione che, nell'ambito delle neuroscienze, sia necessario interrogarsi maggiormente sulla funzione delle memorie nel cervello animale. In particolare mi sembra interessante chiedersi se il cervello di un animale somigli di più ad un computer americano, in cui molte funzioni erano svolte da "organi" predisposti; oppure ad un computer minimalista tipo ACE, in cui gli organi sono costituiti da semplici linee di codice. In entrambi i casi, ci rendiamo conto del fatto che concentrarsi sulla ricerca della funzione di un'area del cervello mediante le tecniche di *neuroimaging* equivale a pretendere di voler conoscere il comportamento di un computer, cercando di capire come sia

fatto senza preoccuparsi di conoscere i programmi che vi girano all'interno. Inoltre il modello di memoria mutuato dall'essere umano, in cui hanno una indubbia importanza larghe memorie in grado di apprendere nel corso della vita dati e algoritmi, potrebbe portare fuori strada nella comprensione del cervello animale, molto probabilmente soggetto più dell'uomo ad informazioni innate: "come fa un cavallo appena nato a sapere come ci si comporta da cavallo?"

I cibernetici si interrogarono molto sul ruolo delle memorie e presero in considerazione anche l'ipotesi che alcune tracce mnestiche utilizzassero molecole simili all'RNA. Giunsero a ciò per rispondere alla seguente domanda di von Neumann: come fa una formica dotata di non più di 300 neuroni centrali a manifestare la varietà di comportamento che essa esibisce? Si consideri che i cibernetici avevano ben presenti le considerazioni gestaltistiche sull'intelligenza del formicaio, che in qualche modo possiede una conoscenza maggiore di quella della singola formica; tuttavia una rete neuronale di 300 neuroni, parallelizzata quanto si vuole, sembrava loro davvero troppo piccola per spiegare il comportamento di una formica [cfr. *Macy* 6, p. 12; cfr. il commento in Montagnini 2010, pp. 159-160]. Si consideri anche che i primi cibernetici non hanno mai assolutizzato la descrizione digitale del cervello, supponendo un importante ruolo per gli aspetti analogici. E questo proprio perché, in generale, come emerge ampiamente dalla presente ricerca, la distinzione netta fra analogico e digitale non apparteneva alla cultura del loro tempo ma vi si pervenne negli anni successivi.

Questi interrogativi, che non vogliono essere più che suggestioni, invitano a riprendere in mano il metodo comparativo della Cibernetica. Esso fu abbandonato, non confutato nella sua pregnanza euristica.

Il ruolo della genialità individuale nella ricerca di base

Nel complesso e corposo volume collettivo *Memoria e progetto* [Greco e Termini 2010], dedicato al quarantennale dell'Istituto di Cibernetica "E. R. Caianiello", con uno sguardo alla storia ed uno progettuale al futuro, si è indicata come via maestra per il rilancio del sistema economico del Mezzogiorno e dell'Italia nel suo complesso una politica di investimenti pubblici nella scienza e nell'alta formazione [cfr. per esempio Pietro Greco, p. 200]. Da molti contributi al libro emerge anche una più specifica indicazione ad investire nella ricerca di base, un tipo di ricerca che Ernesto Burattini vede, anzi, come missione stessa degli istituti di ricerca [p. 74], una ricerca in cui – come rileva Rino Falcone – è elemento chiave il fattore umano [p. 275], e che per Lucio Bianco deve essere «*curiosity driven*», trainata «dalla curiosità del ricercatore» [pp. 248-249]. Questa riflessione si inquadra nella consapevolezza che la ricerca di base non è in contrapposizione con quella applicativa,⁵⁵² ma si intreccia creativamente con essa, come è stato messo in luce da Settimo Termini che fa dire a Wiener:

«ma le applicazioni dovevano avvenire all'interno di una visione complessiva del mondo non trascinat[e] dal puro agire e funzionare di una tecnica di cui non conosceamo il modo scientifico del suo operare» [ivi, p. 343].

Tali idee, mi sembra, trovano conferma nella mia disamina delle vicende della prima Cibernetica. Per le ragioni sopra dette, la Cibernetica è apparsa irrinunciabilmente come un Giano bifronte, sorta di chimera metà scienza pura e metà ingegneria, un discorso che può ben adattarsi a quel vasto insieme di discipline che ne hanno preso il testimone e che viene indicato oggi con l'espressione di "scienze e ingegneria dell'informazione". Il computer, la "macchina logica" come lo chiamava Wiener, è in ciò l'epitome di questa dimensione ibrida, se si considera che la logica è stata disciplina eminentemente teoretica, per almeno due millenni, da

⁵⁵² Cfr. *ivi*, Bianco, p. 248, Falcone, p. 277, Pugliese, p. 251.

Aristotele e gli stoici, passando per gli scolastici, fino a Peano e Russell, impensabilmente correlabile con il mondo delle macchine, territorio esclusivo dell'agire empirico di artigiani e ingegneri.

Nella prima parte di questa ricerca ho preso le distanze dalla tesi di David Mindell, che peraltro stimo molto per le sue precise e documentate ricerche, ma che annulla il ruolo degli individui di genio nell'ambito della Cibernetica, in favore del contesto, dell'attività minuta e oscura di tanti individui, spesso ingegneri, sovente operanti all'interno dei centri di ricerca delle compagnie industriali. Tale tesi mi è sembrata non vera ed anche piuttosto ingiusta nei confronti della persona di Wiener, che ha difeso con vigore nel dopoguerra l'idea di un'attività scientifica di qualità imperniata su scienziati di altissima statura personale. Riflettendo sul contesto della scoperta, in *The Human Use of Human Being* (1950), Wiener sosteneva che durante la guerra era stato massicciamente sfruttato un patrimonio di conoscenze accumulate nei decenni precedenti, che poi sarebbe stato necessario ricreare. Scriveva:

«To replace it, we need a range of thought that will really unite the different sciences, shared among a group of men who are thoroughly trained, each in his own field, but who also possess a competent knowledge of adjoining field. No, size is not enough. We need to cultivate fertility of thought as we have cultivated efficiency in administration. [...] We cannot afford to erode the brains of the country as we have eroded its soil [Wiener 1950, pp. 57-8].

È emerso dalla mia ricostruzione come indubbiamente la Prima Cibernetica sia stata il teatro in cui si esplicò l'attività di un manipolo di persone assolutamente geniali; alcune, come von Neumann, forse anche troppo emotivamente stabili, altre molto meno, come per lo più capita con le persone massimamente creative e sensibili, ed era il caso di Wiener e Pitts, e forse anche di Turing: instabili "figli della luna", come li chiamava Warren Weaver. Alcuni di essi, giovanissimi, come Craik, Shannon, Turing e Pitts, nell'età di massima creatività per lo scienziato e specialmente per il matematico furono gettati nella mischia della guerra più sanguinosa che la storia ricordi, terminata con l'olocausto nucleare, a lavorare secondo regole disciplinari tipiche dei militari, che facevano a pugni con la creatività dello scienziato.

In generale, comunque, i più giovani e i meno giovani avevano una formazione multidisciplinare e ricca, a cavallo tra filosofia, matematica, biologia e scienze applicate. Non si può negare il ruolo determinante da essi svolto nell'ambito della Cibernetica. Senza di essi non si sarebbe avuto in così breve tempo il computer ad architettura von Neumann.

Non si vuol mettere in discussione però il ruolo dell'ingegnere e della sua creatività pratica. Confesso che, all'inizio di questo lavoro, ero piuttosto consapevole delle difficoltà che la ricerca interdisciplinare comporta, proprio in quanto le persone che vengono in contatto attraverso di essa, provenienti da tradizioni disciplinari diverse, possiedono *formae mentis* differenti, che condizionano il loro modo di osservare, inquadrare, trattare quello che è il medesimo territorio di fatti [cfr. Montagnini s.d.]. Sapevo che durante le Macy Conferences si erano verificate in questo senso linee di frattura tra scienze *hard* e scienze *soft* [cfr. Montagnini 2000-2001], oppure tra chi possedeva un retroterra olistico e chi era più propenso ad un approccio elementaristico allo studio della realtà [cfr. Montagnini 2008]; non sospettavo, però, che la faglia tettonica principale passasse tra ingegneri e scienziati; una situazione particolarmente critica visto che la Cibernetica, come detto, è per definizione un coacervo di ingegneria e scienza.

Nella seconda e terza parte, occupandoci soprattutto dell'ambito computazionale, tale frattura è apparsa addirittura più netta che nella prima, togliendo di mezzo il dubbio che taluni attriti emersi nel 1942 nell'ambito della ricerca sui predittori dipendessero dall'instabilità emotiva di Wiener. Von Neumann con ben altra corazza psicologica e sociale di Wiener, ebbe altrettanti guai con gli ingegneri e sempre a motivo della loro convinzione che il matematico e

lo scienziato in genere forniscono solo semplici idee, mentre è l'ingegnere che costruisce le macchine e può brevettarle. Occorre riconoscere – e lo conferma, ancor meglio della storia del computer americano, quella del computer in Gran Bretagna, terra in cui tale frattura era ancora più ampia che negli Stati Uniti – che, senza gli ingegneri, i computer non si sarebbero fatti; di ciò si rese perfettamente conto Alan Turing, quando dopo la sua visita all'IAS di Princeton invitò a trovare forme di collaborazione più strette tra matematici e ingegneri per il progetto sull'ACE. I computer non sarebbero mai stati realizzati prescindendo dalla visione larga tipica dei matematici e degli scienziati multidisciplinari protagonisti della Cibernetica, spinti prevalentemente da un movente conoscitivo. Tuttavia, senza gli ingegneri, l'ACE sarebbe rimasto solo una macchina di carta. La formula giusta, almeno in quel contesto, ma forse in tutti, è data da una collaborazione rispettosa gli uni delle prerogative degli altri.

Un altro problema, che si avrebbe torto a considerare solo come un portato della mentalità ingegneristica, nasce dalla scoperta delle difficoltà straordinarie che incontrò il calcolatore digitale elettronico presso i responsabili della Sezione D2 e della sua erede Divisione 7. La triste sequela di bocciature inflitte a questo tipo di progetti dal 1940 al 1946, da parte di ingegneri come Caldwell e Hazen, con qualche intervento dello stesso Bush, e di un matematico come Stibitz, è in proposito estremamente rivelatrice. Tra l'altro, non mi risulta che questa interessante vicenda sia mai stata ricostruita con la chiarezza con cui emerge nel presente lavoro. La vicenda dimostra come la materia del contendere riguardo ai calcolatori non fosse tra approccio analogico e approccio digitale, ma che gli ostacoli all'affermazione del computer discendevano da una mentalità dei decisori politici ispirata a quel «puro agire e funzionare di una tecnica di cui non conoscevamo il modo scientifico del suo operare», di cui parla Settimo Termini, un modo di pensare e di operare che può essere davvero deleterio per la scoperta scientifica e per l'invenzione.

Abbiamo dei contro esempi: Richard Taylor, che all'MIT aveva recepito le istanze di von Neumann sulle applicazioni del computer; Julian Bigelow, la cui personalità ben si amalgamò con lo stile di lavoro, prima di Wiener e poi di von Neumann; ma anche l'operosità creativa degli ingegneri dell'ENIAC e dell'EDVAC o di quelli dell'RCA. La linea di Caldwell e Hazen non è un portato necessario dell'essere ingegneri, ma forse solo una tentazione. La personalità di Caldwell è forse la più esemplare in questo contesto. Si potrebbe ritenere che egli fosse libero da preconcetti verso il calcolo digitale elettronico, visto che aveva presieduto per quattro anni il progetto dell'MIT Rapid Arithmetical Machine. Eppure fu il più fiero oppositore di tutti i progetti per calcolatori elettronici digitali, dei quali non riusciva a scorgere le novità rispetto alle macchine di Stibitz e agli Analizzatori differenziali di Bush. Pensava al computer con una mentalità, invariata dall'epoca di Leibniz, che aveva dato luogo ai centri di calcolo adibiti al compito di stilare tavole in maniera industriale. A questo modo di pensare si aggiungeva la convinzione che i progetti scientifici potessero essere messi senza danno “sotto naftalina” per un periodo di tempo imprecisato, come se la storia procedesse in maniera lineare: uno stile di lavoro bradisismico e burocratico che poi ebbe ripercussioni sull'abortito progetto di computer digitale dell'MIT, finanziato dalla Rockefeller Foundation nel dopoguerra. In tutto ciò ebbe un ruolo davvero paradossalmente conservatore la sua esperienza pregressa sull'MIT Rapid Arithmetical Machine, a dimostrazione di una regola che varrà sempre nella futura informatica, secondo cui l'esperienza acquisita può in taluni casi rivelarsi come una zavorra. L'innovazione non può essere concepita come un impiegatizio processo di giustapposizione ripetitiva. Ciò fa venire in mente una polemica che Wiener fa verso i grandi centri di ricerca nel libro *Invention*, quando scrive:

«l'uso della mente umana per lo sviluppo di concetti realmente innovativi è ogni volta un fenomeno nuovo. Aspettarsi di ottenere idee nuove, di rilevanza concreta, moltiplicando l'attività

umana di basso livello e ristrutturando in maniera casuale vecchie idee, senza che una mente di prima classe ne guidi il vaglio, è un'altra forma di quel ragionamento erroneo a proposito delle scimmie e della macchina da scrivere, che già compare, in una forma leggermente più semplice, nel *Viaggio a Laputa* di Swift» [Wiener 1954, pp. 112-3].

La storia è quella di scimmie messe a battere su macchine da scrivere che alla fine scriveranno tutti i libri di letteratura. Peccato, aggiunge Wiener, che per capire quali sono le pagine dotate di significato sarà comunque necessario un uomo, una «grande mente» nel caso del lavoro da formiche che emerge dai grandi laboratori.

Non si può negare l'importanza del contesto. Sebbene non del tutto indipendente da quella americana, l'esperienza inglese mostra come il problema della difesa antiaerea ponesse sul tappeto problemi "cibernetici". Occorreva però il genio di persone come Wiener per vedere connessioni che né i tecnici dei BTL né quelli inglesi a prima vista avevano colto.

L'innovazione ha anche bisogno di una forte spinta idealistica. L'idea di Turing di fare un cervello artificiale, oppure quella condivisa un po' da tutti i cibernetici di capire il funzionamento del cervello umano sfruttando il parallelo con le nuove acquisizioni sui computer; o ancora il progetto di von Neumann per una Teoria degli Automi che spiegasse come sistemi complessi reali si autoriproducono, pensano, affrontano i malfunzionamenti; tutte queste idee sono il parto di grandi sognatori che, però, sapevano tenere i piedi per terra, in grado cioè di integrare *Imagination and Rigor*, per dirla con un'espressione di Bateson, che è divenuta il titolo di un libro su Caianiello [cfr. Termini 2006]. Sotto questo profilo, vedo molto motivanti ed affascinanti le "Grand Challenges" proposte dall'UK Computing Research Committee, come ad esempio, *The Architecture of Brain and Mind*. Al contrario sembrano molto meno idealistiche, quasi timorose di non giungere subito a qualcosa di applicativo, le "Grand Challenges" dell'Information Society Advisory Group dell'Unione Europea, come quella sulla sicurezza nella guida automobilistica con un car-to-car communication systems, ed altri sistemi di sensori; un Internet Police Agent o una Pervasive Communication Jacket. A parte la filosofia del controllo che sembra ispirarle e che può infastidire chi abbia a cuore il modello della società aperta, si fa fatica a vedervi degli obiettivi suggestivi, in grado di appassionare ricercatori e pubblico.

Un progetto come il *SyNAPSE* (Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics)⁵⁵³ sembra invece idealisticamente convincente. Il metodo scelto è di giustapporre tanti micromoduli di reti neuromorfiche nella speranza di giungere prima o poi, una volta raggiunta la scala opportuna, ad un vero e proprio cervello artificiale. Tale approccio cela delle incognite: potrebbe rischiare di cadere nella mentalità alla Caldwell, ma potrebbe anche dare risultati inaspettati, visto che, come riteneva D'Arcy Thompson, con il crescere della scala potrebbero manifestarsi delle proprietà emergenti imprevedute. D'altro canto, per giungere a fare un cervello artificiale, non mi sembra sufficiente passare da un'architettura seriale *à la* von Neumann ad un connessionismo spinto. Questo potrebbe portare, forse, a costruire computer ancora più veloci, che magari siano in grado di risolvere problemi intrattabili con gli attuali supercomputer, ma si può dubitare che si riesca a fare con essi davvero una buona imitazione del cervello umano, in quanto per fare un vero cervello artificiale sarebbe necessario sapere almeno a grandi linee come funziona un cervello naturale.

Per concludere con gli aspetti relativi al contesto della scoperta, mi sembra che la nostra storia indichi anche che, affinché un progetto abbia successo, occorre che le persone dotate di idee siano protette ed incoraggiate dal potere politico ed economico. L'ENIAC o l'IAS Computer non sarebbero stati realizzati senza che alcuni ufficiali delle forze armate degli Stati

⁵⁵³[http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Systems_of_Neuromorphic_Adaptive_Plastic_Scalable_Electronics_\(SYNAPSE\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Systems_of_Neuromorphic_Adaptive_Plastic_Scalable_Electronics_(SYNAPSE).aspx).

Uniti contestassero con forza idee che NDRC e compagnie private osteggiavano. Il potere politico - che si sposi il keynesismo o no - ha una rilevanza fondamentale nello sviluppo della scienza moderna, almeno dai tempi in cui l'Arsenale di Venezia finanziava il telescopio di Galileo Galilei. D'altro canto accademie, fondazioni private e università, per il fatto di essere almeno in parte disancorate dalla logica del profitto che guida le compagnie private, le quali debbono sottostare alle dure leggi di mercato, come indicava Wiener nel libro sull'*Invention*, dovrebbero invece seguire logiche alternative, maggiormente rischiose, scommettendo sull'improbabile, incoraggiando le idee controcorrente, piuttosto che premiare quelle che costituiscono già un patrimonio acquisito [cfr. Wiener 1954, it. p. 133]. Si tratta di una logica che, come abbiamo visto nel caso del rifiuto opposto dalla Rockefeller Foundation alla richiesta di von Neumann di finanziamenti per l'IAS computer, non è sempre facilmente compresa. Occorre anche rilevare l'importanza delle esigenze, dei bisogni impellenti, che da soli non sono in grado di promuovere la ricerca, ma che possono farlo quando i progetti che ad essi promettono di rispondere sono opportunamente appoggiati dai decisori. Mi sembra che sia stato ampiamente dimostrato nei capitoli precedenti quanto stretta sia stata la connessione tra la Cibernetica, ed in particolare lo sviluppo del computer, con le esigenze di calcolo provenienti da Los Alamos. Ciononostante, persino quelle esigenze incontrarono resistenze, non tanto di tipo etico, che personalmente non potrei non sottoscrivere, ma prodotte da mentalità affaristiche o burocratiche.

BIBLIOGRAFIA

ARCHIVI

BAIW = Bush Archive, Carnegie Institution of Washington (CIW) Records.

BALC = Bush Archive, Library of Congress.

DTIC = Defense Technical Information Center, <http://www.dtic.mil/dtic/>.

FDRPL = Franklin Delano Roosevelt Presidential Library and Museum di Hyde Park, New York. Consultato on line: <http://www.fdrlibrary.marist.edu>.

HGAPS = Herman Goldstine Papers, American Philosophical Society Library, Philadelphia

HSRC = Honeywell-Sperry Rand Litigation Records, Charles Babbage Institute Archives, Minneapolis.

HSRH = Honeywell-Sperry Rand Litigation Records, Hagley Library, Wilmington, Delaware.

LANLA = Los Alamos National Laboratory Archives.

LANLH50 = Los Alamos National Laboratory History. Fotoriproduzioni pdf di documenti declassificati posti a corredo dell'articolo 50th Anniversary: Evolving from Calculators to Computers. Reperiti in data 21/07/2010 sul sito www.lanl.gov/history/atomicbomb/computers.shtml

LATFAS = Los Alamos Technical Reports. Archivio on line della FAS (Federation of American Scientists), all'indirizzo www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl; tenuto in vita da Steven Aftergood, conserva fotoriproduzioni in pdf di documenti declassificati del Los Alamos Laboratory, precedentemente messi on line dalla Library Without Walls project.

MCAPS = Archivio McCulloch, Library of the American Philosophical Society di Philadelphia.

NARA = US National Archives and Records Administration, già NARS.

NARS = US National Archives Record Records Services, Washington, D.C. Ora NARA

UPA = University of Pennsylvania Archives

VNLC = Papers of John Von Neumann, Library of Congress, Manuscript Division. Ringrazio la Library of Congress ed in particolare Mr. Brock Hutchison per avermi cortesemente inviato fotocopia dei carteggi tra di von Neumann con Wiener, e con Rudolf Ortway custoditi in questi archivi.

VBLC = Vannevar Bush Collection, Library of Congress

WAMIT = Wiener Archives, MIT.

OHCB = Oral History Collection, Charles Babbage Institute, Minneapolis.

TIA = The Internet Archive, <http://www.archive.org>

OMIKK = National Technical Information Center and Library, Budapest.

ALTRI ACRONIMI E ABBREVIAZIONI UTILIZZATE NEL TESTO

(Qualora non sia indicato espressamente l'istituzione a cui la sigla si riferisce è statunitense)

ACS = Admiralty Computing Service (UK)

AMP = Applied Mathematics Panel of NDRC.

AMS = American Mathematical Society.

AT&T = American Telephone & Telegraph Corporation. È il risultato della fusione della Bell Telephone Company, interessata ai telefoni con la Western Electric, interessata alle comunicazioni telegrafiche su lunga distanza.

BCSO = British Central Scientific Office.

BRL = Ballistic Research Laboratory, presso l'Aberdeen Proving Ground.

BTL = Bell Telephone Laboratories. I BTL dalla fine dell'Ottocento sono il reparto di R&S dell'AT&T. Nel 1925 i BTL assumono un assetto giuridico di compagnia autonoma, ma l'AT&T resta il loro azionista di riferimento. Cfr. *EB97 CD*, voce "AT&T Corporation".

BuOrd = Bureau of Ordnance, attivo tra il 1862 e il 1959. L'organizzazione della US Navy che si occupava degli approvvigionamenti.

CIW = Carnegie Institution of Washington o Carnegie Institution for Science. La CIW appartiene alla galassia delle 23 fondazioni create a cavallo tra Otto e Novecento dal magnate dell'acciaio Andrew Carnegie che devolvette gran parte della sua fortuna a scopi filantropici (<http://www.ciw.edu/about/history>). Scopo della CIW era ed è quello di promuovere la ricerca scientifica in particolare quella relativa alle scienze dello spazio, della terra e della vita (<http://www.ciw.edu/>).

CMR = Committee on Medical Research.

DARPA = Defense Advanced Research Projects Agency.

DIC = Division of Industrial Cooperation of the MIT. Assorbita nella DSR nel 1956.

DSR = Division of Sponsored Research of the MIT. Nata nel 1955 mentre la DIC era ancora in vita.

EDO = Equazione Differenziale Ordinaria; ingl.: "Ordinary Differential Equation" (ODE), talvolta "Total Differential Equation".

EDP = Equazione Differenziale alle Derivate Parziali; inglese "Partial Differential Equation" (PDE).

ERA = Engineering Research Associates, poi incorporata dalla Remington Rand.

GC&CS = Government Code & Cipher School (UK).

INAC = Istituto per le Applicazioni del Calcolo del CNR italiano diretto da Mario Picone.
 INI = Illinois Neuropsychiatric Institute
 LANL = Los Alamos National Laboratory.
 MAA = Mathematical Association of America.
 MIT = Massachusetts Institute of Technology.
 NACA = National Advisory Committee for Aeronautics. Si pronuncia facendo lo spelling. Nel 1958 l'NACA sarà trasformato nella NASA.
 NASA = National Aeronautics and Space Administration. Si pronuncia come parola unita. Nata nel 1958 dall'ex NACA.
 NCR = National Cash Register Company. Compagnia fondata nel 1884 a Dayton, Ohio. Fu la prima compagnia statunitense a commercializzare i registratori di cassa. Tra le altre cose, durante la Seconda guerra mondiale ebbe un contratto per le ricerche crittologiche per la US Navy.
 NDRC = National Defense Research Committee
 NPL = National Physical Laboratory, Teddington (UK)
 NSA = National Security Agency
 OP-20-G = Office of Chief of Naval Operations (OPNAV) [20th Division of the Office of Naval Communications, G Section - Communications Security], era la Sezione della US Navy che si occupava di crittologia.
 ORNL = Oak Ridge National Laboratory, in località Oak Ridge, Tennessee, presso Knoxville.
 OSRD = Office of Scientific Research and Development.
 RLE = MIT Research Laboratory of Electronic, già MIT Radiation Laboratory.
 Sperry = Sperry Gyroscope Company, fondata nel 1910, prenderà nel 1933 il nome di Sperry Corporation, e nel 1955 di Sperry Rand.
 SSA = Army Signal Security Agency, erede dal 1943 dell'Army Signal Intelligence Service.
 UC = University of Chicago.
 UIC = Università dell'Illinois a Chicago.
 UKCRC = UK Computing Research Committee.

LIVELLI DI SEGRETEZZA DEI DOCUMENTI NEGLI STATI UNITI DURANTE LA SECONDA GUERRA MONDIALE (e confronto con quelli italiani)

Top Secret (TS) = Segretissimo

Secret = Segreto

Confidential = Riservatissimo

Restricted = *Riservato* [livello poi soppresso negli Stati Uniti nel dopoguerra]

I documenti di argomento nucleare hanno una loro specifica classificazione. In generale gli Stati Uniti aggiungono RD, così ad esempio "Secret RD" corrisponde all'inglese "UK Secret Atomic" [Cfr. http://badge.lanl.gov/uk-usa_classification.shtml].

N.B.: Si è naturalmente avuto cura di accertarsi che i documenti citati nel testo inizialmente sottoposti a segreto siano oggi da considerarsi pubblici senza nessuna restrizione.

ELENCO DOCUMENTI E PUBBLICAZIONI UTILIZZATI

N.B.: Delle lettere ed altri documenti che non sono da considerarsi come veri e propri memoranda si è data notizia solo nelle note in calce al testo.

- [50th Anniversary] Anon, "50th Anniversary. Evolving from Calculators to Computers," Reperito in data 21/07/2010 sul sito www.lanl.gov/history/atomicbomb/computers.shtml
- [Abelson 1996] Philip H. Abelson, "Merle Antony Tuve," in *National Academy of Sciences. Biographical Memoirs*, Washington, National Academy of Sciences, v. 70 (1996), pp. 406-423.
- [Abraham 2000] Tara H. Abraham, "*Microscopic cybernetics*": *Mathematical Logic, Automata Theory, and The Formalization of Biological Phenomena, 1936-1970*, Ph. D. Thesis, Graduate Department of the History and Philosophy of Science and Technology, University of Toronto, 2000.
- [Abraham 2002] Tara H. Abraham, "(Phisio)logical circuits. The intellectual origins of the McCulloch-Pitts Neural networks", in *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, Vol. 38, No.1, (2002), pp. 3-25.
- [Abraham 2004] Tara H. Abraham, "Nicolas Rashevsky's Mathematical Biophysics", in *Journal of the History of Biology*, v. 37 (2004), pp. 333-385.
- [ACH 1999] *American Cultural History*, Lone Star College Kingwood, 1999, cap. "1940 - 1949", <http://kclibrary.lonestar.edu>.

- [Adolph 1961] E. F. Adolph, "Early concepts of physiological regulations", in *Physiological reviews* 41(1961), pp. 737-770.
- [Aiken 1973] Howard Aiken. Intervista di Henry Tropp e I.B. Cohen, 26-27 febbraio 1973, in "Computer Oral History Collection, Archives Center, Smithsonian National Museum of American History." Reperita sul sito web <http://invention.smithsonian.org/>. Repository: Archives Center, National Museum of American History.
- [Akera e Nebeker 2002] Atsushi Akera e Frederik Nebeker (cur.), *FROM 0 to 1 : an authoritative history of modern computing*. Oxford : O.U.P., 2002.
- [Aldrich 2007] John Aldrich, "But you have to remember P.J.Daniell of Sheffield", *Electronic Journ@l for History of Probability and Statistics*, December 2007.
- [Allen 1978] Garland E. Allen, *Life science in the twentieth century*, Cambridge, Cambridge University Press, 1978; tr.it.: Id., *La biologia contemporanea*, Bologna, Il Mulino, 1985.
- [Alt 1948] F. L. Alt, «A Bell Telephone Laboratories' Computing Machine », parti I e II, *Math. Tables and Other Aids to Computation*, vol. 3 (1948), pp. 1-13 e 69-84.
- [Ampère 1843] André-Marie Ampère, *Essai sur la philosophie des sciences ou Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*, Paris, Bachelier, 1843.
- [Anderson e Rosenfeld 2000] Intervista a Jerome Y. Lettvin, June 2, 1994, con materiale aggiunto nel 1997, in James A. Anderson and Edward Rosenfeld, eds, *Talking nets. An oral history of neural networks*, Cambridge, Mass., MIT Press, 2000.
- [Anderson e Rosenfeld 2000] James A. Anderson e Edward Rosenfeld (cur.), *Talking nets. An oral history of neural networks*, Cambridge, Mass., MIT Press, 2000.
- [Andrews 1951] E. G. Andrews, "A Review of the Bell Laboratories Digital Computer Developments", *AFIPS, 1951 Proceedings of the Review of Electronic Digital Computers*, 1951, pp. 101-104.
- [Anon 1902] Anon, "The Electrical Tabulating Machine Applied to Cost Accounting", in *American Machinist*, 25 (1902), pp. 1073-1075.
- [Arbib 1964] Michael A. Arbib, *Brains, Machines and Mathematics*, New York, McGraw Hill 1964; tr. it.: Id., *La Mente, le Machine e la Matematica*, Boringhieri, Torino 1968.
- [Archibald 1946] R. C. Archibald, "Conference on Advanced Computation Techniques", *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, Vol. 2, No. 14 (Apr., 1946), pp. 65-68.
- [Aspray 1990a] William Aspray, *John von Neumann and the origins of modern computing*, Cambridge (Mass.) - London (Engl.), Mit Press, 1990.
- [Aspray 1990b] William Aspray, "The origins of John von Neumann's theory of automata", in [Glimm *et al.* 1990], pp. 289-309.
- [Aspray 2000] William Aspray, "Was Early Entry a Competitive Advantage? US Universities That Entered Computing in the 1940s", in *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 22, No. 3 July-September (2000) pp. 42-87.
- [Aubin e Dahan Dalmedico 2002] David Aubin e Amy Dahan Dalmedico, "Writing the History of Dynamical Systems and Chaos. Longue Durée and Revolution, Disciplines and Cultures", in *Historia Mathematica* 29 (2002), pp. 273-339.
- [Bainbridge e Roco 2005] William Sims Bainbridge e Mihail C. Roco (cur.), *Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innovations. Converging Technologies in Society*, Dordrecht, Springer, 2005.
- [BAMS 1966] "Norbert Wiener (1894-1964)", in *Bulletin of the American Mathematical Society*, 72 (1966), n. 1, parte 2. Numero dedicato in *Memoriam*.
- [Bartlett 1946] Frederic Charles Bartlett, "Obituary notice: K. J. W. Craik", in *British Journal of Psychology*, Vol. 36 No. 3 (1946), pp. 109-116.
- [Bartlett 1946] Frederic Charles Bartlett, "Obituary Notice: Kenneth. L W Craik, 1914-1945", in *British Journal of Psychology. General Section*, Vol. 36, No. 3 (1946) pp. 109-115, 111.
- [Bashe *et al.* 1986] Charles J. Bashe *et al.*, *IBM's early computers*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1986, pp. 22-24.
- [Bates 1947] J.A.V. Bates, "Some characteristics of a human operator", in *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIA: Automatic Regulators and Servo Mechanisms*, Vol. 94, No. 2 (1947) pp. 298-304.
- [Bateson 1972] Gregory Bateson, *Steps to an Ecology of Mind*, New York, Ballantine Book, 1972, 1975.
- [Battimelli 1986] Giovanni Battimelli, "On the history of the statistical theory of turbulence", in *Revista Mexicana de Fisica*, 32 (1986).
- [Battimelli 2002] Giovanni Battimelli, *Illustri sconosciuti. Il gigante della meccanica*, in www.galileonet.it, 1° gennaio 2002.
- [Battimelli e Paoloni 2008] Giovanni Battimelli e Giovanni Paoloni, "Il ministro scienziato", in *Le Scienze*, 484 dicembre (2008), pp. 112-118.
- [Battimelli e Paoloni s.d.] Giovanni Battimelli e Giovanni Paoloni, "Enrico Fermi – 1938 Roma 1901 – Chicago 1954, testo di catalogo", in *Beautiful Minds*, in Esposizioni online, Istituto e Museo di Storia della Scienza, <http://www.imss.fi.it/indice.html>

- [Bauer 1990] Friedrich L. Bauer, "Helmut T. Schreyer. Translation of a 1984 Obituary", in *Annals of the History of Computing*, Vol. 12, Number 3, (1990).
- [Bauer 2007] Friedrich L. Bauer, *Kurze Geschichte der Informatik*, Paderborn, Wilhelm Fink, 2007; tr. engl.: Id, *Origins and Foundations of Computing*, Berlin – Heidelberg, Springer, 2010.
- [Baxter 1946] James Phinney Baxter, *Scientists against Time*, Boston, Little Brown, 1946, 2. ed. 1948.
- [Bennecke 2000] Andreas Bennecke, *A Classification Scheme for Program Controlled Calculators*, in [Rojas e Ulf 2000], pp. 53-68.
- [Bennett 1979] Stuart Bennett, *History of Control Engineering 1800-1930*, Londra, Peter Peregrinus, 1979.
- [Bennett 1985] Stuart Bennett, "Harold Hazen and the Theory and Design of Servomechanisms", in *Int. J. Control* 42 (no. 5, 1985), 989-1012.
- [Bennett 1993] Stuart Bennett, *History of Control Engineering 1930-1950*, Londra, Peter Peregrinus, 1993.
- [Bennett 1994] Stuart Bennett, "Norbert Wiener and control of anti-aircraft guns", in *IEEE Control Systems Magazine*, v. 14/6 (1994), pp. 58-62.
- [Bennett et al. 1933] A. A. Bennett, W. E. Milne e H. Bateman, "Numerical Integration of Differential Equations", in *Bulletin National Research Council*, 92, Washington, 1933.
- [Benson 1997] Robert Louis Benson, *A History of U.S. Communications Intelligence during World War II: Policy and Administration*, Series IV, World War II, Vol. 8, Center for Cryptological History, National Security Agency, 1997.
- [Bergson 1896] Henri Bergson, *Matière et mémoire. Essai sur la relation du corps à l'esprit*, 1. Ed., 1896 Paris: Les P.U.F., 1965.
- [Bernstein 1991] Richard J. Bernstein, Pragmatismo, pluralismo e risanamento delle ferite in appendice a La nuova costellazione. Gli orizzonti etico-politici del moderno/postmoderno, Milano, Feltrinelli, 1994 (ed. orig. 1991).
- [Bernstein 1992] Richard J. Bernstein, "The Resurgence of Pragmatism", in *Social research*, vol. 59, n. 4 (1992), pp. 813-4.
- [Bianco 2010] Lucio Bianco, "Il rapporto tra ricerca e sviluppo nell'economia della conoscenza", in [Greco e Termini 2010], pp. 247-250.
- [Bigelow 1971] Julian H. Bigelow, Intervista di Richard R. Mertz, 20 gennaio 1971, in "Computer Oral History Collection, Archives Center, Smithsonian National Museum of American History." Reperita sul sito web <http://invention.smithsonian.org/>.
- [Bigelow's Report of conference] Julian H. Bigelow, "Report of conference at Bell Laboratories", in 4 giugno 1941. NAR, Record Group 227, Records of the OSRD, General Project Files, Project 6 Folder 1 1940-1941. Brani sono citati in Hagemeyer (1979) e Bennett (1994).
- [Birkhoff 1931] George David Birkhoff, "Proof of the ergodic theorem", in *Proceedings National Academy of Science*, 17 (1931) pp. 656–660.
- [Bissell 1994] Christopher Bissell, "Arnold Tustin 1899-1994", in *International Journal of Control*, Vol 60, No 5 (1994), pp. 649-652.
- [Bissell 2001] Christopher Bissell, "The role of A. A. Andronov in the development of automatic control in Russia", in *Automation and Remote Control*, (2001), pp. 1-15 (in russo); reperibile in glesse sul sito: <http://ict.open.ac.uk/reports/1.pdf>
- [Bissell 2009] Christopher Bissell, "A History of Automatic Control", in [Nof 2009], pp. 53-69.
- [Bissell 2010] Christopher Bissell, "Not just Norbert", in *Kybernetes*, Vol. 39, No. 4 (2010), pp. 496–509.
- [Black 1934] Harold S. Black, "Stabilized Feed-Back Amplifiers", in *Electrical Engineering (The Official Monthly Journal and Transactions of the A.I.E.E.)*, vol. 53, pp. 114-120, Jan. 1934. Riprodotto in *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, no. 6, June 1984.
- [Bloch 1984] Richard Milton Bloch, An Interview with, OH 66, intervista condotta da William Aspray il 22 February 1984, Newton, MA. Charles Babbage Institute. The Center for the History of Information Processing, University of Minnesota, Minneapolis, Charles Babbage Institute. Oral history database <http://special.lib.umn.edu/cbi/oh>.
- [Bocchi e Ceruti 1991] Gianluca Bocchi e Mauro Ceruti (cur.), *La sfida della complessità*, Milano, Feltrinelli, 1991.
- [Bode 1960] H. W. Bode, "Feedback. The history of an idea", in *Proceedings of the Symposium on Active Networks and Feedback Systems – New York, N.Y. Aprile 19, 20, 21, 1960*, New York, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1960.
- [Bottazzini 1990] Umberto Bottazzini, *Il flauto di Hilbert. Storia della matematica moderna e contemporanea*, Torino, UTET, 1990.
- [Bottazzini 2000a] Umberto Bottazzini, "Il problema dei fondamenti e le teorie logiche", in [Rossi P. 2000], Vol. III: Il secolo ventesimo, Tomo II, pp. 689-729.
- [Bottazzini 2000b] Umberto Bottazzini, "Gödel e gli sviluppi recenti della logica", in [Rossi P. 2000], Vol. III: Il secolo ventesimo, Tomo II, pp. 731-750.

- [Bradley 1902] Francis Herbert Bradley, *Appearance and reality. A metaphysical essay*, 2. ed., London, S. Sonnenschien & co., 1902.
- [Bradley 1914] Francis Herbert Bradley, *Essays on truth and reality*, Oxford, Clarendon press, 1914.
- [Brainerd 1981] John G. Brainerd, "Genesis of the ENIAC", in *Technology and Culture*, 17/3 (luglio 1976), pp. 482-488.
- [Bray 1948] C. W. Bray, Psychology and military proficiency. A history of the Applied Psychology Panel of the National Defense Research Committee. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1948.
- [Bray 2002] John Bray, Innovation and the communications revolution. From the Victorian pioneers to broadband Internet. London, Institution of Electrical Engineers, 2002.
- [Brelot 1966] Marcel Brelot, "Norbert Wiener and potential theory", in *Bulletin of American Mathematical Society*, 72 (1966), Part 2, pp. 39-41.
- [Brennan 1971] Jean Ford Brennan, *The IBM Watson Laboratory at Columbia University. A History*, IBM, Armonk NY, 1971.
- [Breton 1987] Philippe Breton, *Histoire de l'informatique*, Paris, La Découverte, 1987, 2. ed. 1990; Id., *La storia dell'informatica*. Bologna, Cappelli, 1992.
- [Brezzi 1975] Piero Brezzi, Elettronica e società. Un saggio introduttivo con i confronti antologici da N. Wiener [etc.], Messina – Firenze, D'Anna, 1975.
- [Bridgman 1927] Percy Williams Bridgman, *The logic of modern physics*, New York, Macmillan, 1927.
- [Brittain 2007] James E. Brittain, "Electrical Engineering Hall of Fame. Frank B. Jewett", in *Proceedings of the IEEE*, 95-2, (2007), pp. 453-455.
- [Brittain 2010] James E. Brittain, "Electrical Engineering Hall of Fame. Emory L. Chaffee", in *Proceedings of the IEEE* June 2010, Vol. 98 No. 6, pp. 1102 - 1104
- [Brockway 1997] Kim Brockway, "Mario Salvadori, Architect, Engineer", in *Columbia University Record*, vol. 23, No. 2, 12 settembre (1997).
- [Brown 1934] Gordon Brown, Tesi di M.S., MIT 1934
- [Brown 1938] Gordon Brown, Tesi di D. Sc. 1938.
- [Brown 1965] Anne S. Brown, "The National Security Agency Scientific Advisory Board. 1952–1963", in National Security Agency, Fort George G. Meade, Maryland, September 1965. TOP SECRET. FOIA/PA Office (DJP4) www.nsa.gov/public_info/foia
- [Budiansky 2000] Stephen Budiansky, *Battle of Wits: The Complete Story of Codebreaking in World War II*, New York, The Free Press, 2000.
- [Bulmer 1984] M. Bulmer, The Chicago School of Sociology. Institutionalization, Diversity and the Rise of Sociological Research, Chicago, The University of Chicago Press, 1984.
- [Bultheel e Cool 2010] Adhemar Bultheel e Ronald Cool (cur.), *The Birth of Numerical Analysis*, World Scientific Publishing 2010.
- [Burattini 2010] Ernersto Burattini, "Memoria e Progetto", in [Greco e Termini 2010], pp. 69-74.
- [Burcham 1989] W. E. Burcham, "Nuclear physics in the United Kingdom. 1911-1986", in *Journal Reports on Progress in Physics*, 52 (1989), pp. 823-879.
- [Burke 1991] Colin Burke, *Una visione pratica del Memex: la carriera del selettore rapido*, in [Nyce – Kahn 1991a], pp. 91-104.
- [Burke 1994] Colin Burke, "An Introduction to a Historic Computer Document: Betting on the Future - The 1946 Pendergrass Report Cryptanalysis and the Digital Computer". *Cryptologic Quarterly*, Vol. 13, No. 4 (1994) pp. 65-75.
- [Burke 1994] Colin Burke, *Information and Secrecy. Vannevar Bush, Ultra, and the Other Memex*, Metuchen, N.J., Scarecrow Press, 1994.
- [Burks 1947] Arthur W. Burks, "Electronic Computing Circuits of the ENIAC", in *Proc. IRE*, vol. 35 (1947), pp. 756-767.
- [Burks 1987] Arthur W. Burks. Intervistato da William Aspray, 20 giugno 1987, OH 136, Ann Arbor, MI. Los Alamos, NM. Charles Babbage Institute. The Center for the History of Information Processing, University of Minnesota, Minneapolis, Charles Babbage Institute. Oral history database <http://special.lib.umn.edu/cbi/oh>
- [Bush 1929] Vannevar Bush, *Operational circuit analysis*, New York, Wiley, 1929.
- [Bush 1931] Vannevar Bush, "The differential analyzer. A new machine for solving differential equations", in *Journal of the Franklin stitute*, Vol. 212, No. 4, October 1931, pp. 447-488.
- [Bush 1934] Vannevar Bush, "Structural analysis by electric circuit analogies", in *Journal of the Franklin stitute*, V. 217, No. 3 (1934), pp. 289-329.
- [Bush 1936] Vannevar Bush, "Instrumental analysis", in *Bulletin of American Mathematical Society*, 42 (1936), pp. 649-669. Tratto dalla relazione presentata per la 12^a Josiah Willard Gibbs Lecture, a Saint Louis, il 2 gennaio del 1936, in occasione di un convegno congiunto dell'AMS e della Sezione A dell'American Association for the Advancement of Science.

- [Bush 1940] Vannevar Bush, *Arithmetical Machine*, Washington, D.C., 2 marzo 1940, in [Randell 1982a], pp. 337-343. Vannevar Bush Papers, Container 18, Folder: Caldwell, Samuel, 1939-1940. Library of Congress, Washington, D.C.
- [Bush 1945] Vannevar Bush, "As we may Think", in *The Atlantic Monthly*, July (1945), pp. 101-108; tr. it. in [Nyce e Kahn 1991], pp. 41-62.
- [Bush 1970] Vannevar Bush, *Pieces of the action*, New York, Morrow, 1970.
- [Bush e Caldwell 1945] V. Bush e S.H. Caldwell "A new type of differential analyzer" Original Research Article *Journal of the Franklin stitute*, Vol. 240, No. 4, October 1945, Pages 255-326
- [Bush e Hazen 1927a] Vannevar Bush e Harold L. Hazen, "Integrgraph solution of differential equations", in *Journal of the Franklin stitute*, V. 204, N. 5, (1927), pp. 575-579; 580-615
- [Bush e Hazen 1927b] Vannevar Bush e Harold L. Hazen, "Integrgraph solution of differential equations", in *Journal of the Franklin stitute*, V. 204, No. 6, (1927).
- [Bush et. al. 1927] V. Bush, F. D. Gage, H.R. Stewart, "A continuous integrgraph", in *Journal of the Franklin stitute*, V. 203, No. 1, (1927), pp. 63-84.
- [Bush's Report for the First Year] Vannevar Bush, Report of the National Defense Research Committee for the First Year of Operation. June 27, 1940 to June 28, 1941. Documento "declassified", in presentato al presidente Roosevelt con lettera del 16 luglio 1941, in FDRPL, Box 2.
- [Caldwell's Proposal to Section D2] Samuel H. Caldwell, *Proposal to Section D2, NDRC*, November 22, 1940. OSRD, Division 7, General Project Files, 1940-46. Ampi stralci sono stati citati da Masani e Phillips (1985), da Galison (1994). A questa proposta di Caldwell è allegato il documento *Wiener's Principles governing apparatus*.
- [Calimani e Lepschy 1990] Riccardo Calimani e Antonio Lepschy, *Feedback. Guida ai cicli a retroazione: dal controllo automatico al controllo biologico*, Milano, Garzanti, 1990
- [Cannon 1939] Walter Bradford Cannon, *The wisdom of the body*, New York, W.W. Norton & Company, inc., 1939; tr. it. parz. in: [Rossi P. A. 1978], pp. 103-108.
- [Capra 1996] Fritjof Capra, *The web of life : a new scientific understanding of living systems*, New York : Anchor Books, 1996; tr. it.: Id., *La rete della vita*, Milano, Sansoni, 1998.
- [Carnap 1937] Rudolf Carnap, *The logical syntax of language*, London, K. Paul, Trench, Trubner & co., Ltd., 1937; New york Harcourt, Brace and C., 1938.
- [Ceruzzi 1998] Paul E. Ceruzzi, *A History of Modern Computing History of Computing*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1998.
- [Chadrsekhar et al. 1938] S. Chadrsekhar, G. Gamow e M. A. Tuve, "The Problem of Stellar Energy", in *Nature* 141 28 May, 1938, p. 982.
- [Chandrsekhar 1939] Subrahmanyam Chandrasekhar, *An Introduction to the Study of Stellar Structure*, Chicago, University of Chicago Press, 1939.
- [Chandrsekhar 1943] Subrahmanyam Chandrasekhar, "Stochastic Problems in Physics and Astronomy", in *Reviews of Modern Physics*, 15 (1943), pp. 1-89.
- [Chandrsekhar 1961] Subrahmanyam Chandrasekhar, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford, Clarendon Press, 1961.
- [Chandrsekhar 1977] Subrahmanyam Chandrasekhar. Intervistato da S. Weart, 17 maggio 1977, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.
- [Chandrsekhar et al. 1938] S. Chandrasekhar, G. Gamov e M. A. Tuve, "The problem of Stellar Energy", in *Nature*, vol 141, maggio (1938), p. 882
- [Christopherson e Southwell 1938] D. G. Christopherson and R. V. Southwell, "Relaxation Methods Applied to Engineering. III. Problems Involving Two Independent Variables Problems", in *Proc. R. Soc. Lond. A*, 168, (1938) pp. 317-350.
- [Church 1953] Alonzo Church, Reviewed work by Theodore A. Kalin: *Formal Logic and Switching Circuits*, in *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 18, No. 4 (Dec., 1953), pp. 345-346.
- [CISC 1962] Le concept d'information dans la science contemporaine (Colloques Philosophiques Internationaux de Royaumont, luglio 1962) Paris, Gauthier-Villars, 1965; tr. it. parziale: Il concetto di informazione nella scienza contemporanea, a cura di Rossana Rossanda, Bari, De Donato, 1971.
- [Cohen 1999] I. Bernard Cohen, *Howard Aiken: Portrait of a Computer Pioneer*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1999.
- [Cohen 2003] I. Bernard Cohen, "Mark I", in *Harvard Encyclopedia of Computer Science*, 4th edition, pp. 1078 - 1080, Chichester, UK, John Wiley and Sons, 2003.
- [Collinson 2002] Simon Collinson, "September 2002 - Kenneth Craik", in *TPM On line*, Settembre 2002, http://www.philosophers.co.uk/cafe/phil_sep2002.htm.
- [Compton 1940] Karl Taylor Compton, "President's Report Issue 1939-1940, Covering Period from Meeting of Corporation October, 1939 to Meeting of Corporation October, 1940, *Massachusetts of Technology Bulletin* Vol. 76, No. 1, October 1940.

- [Compton 1945] Karl Taylor Compton, "President's Report Issue, 1944-1945", in *Massachusetts Institute of Technology Bulletin*, 81-1 (1945).
- [Comrie 1936] L. J. Comrie, "Inverse interpolation and scientific applications of the National Accounting Machine," *J. Royal Statist. Soc. Suppl.*, 3 (1936), pp. 87-114.
- [Copeland et al. 2006] B. Jack Copeland et al., *Colossus. The secrets of Bletchley Park's code-breaking computers*, Oxford University Press, 2006.
- [Cordeschi 2002] Roberto Cordeschi, *The discovery of the artificial. Behavior, mind and machines before and beyond cybernetics*, Dordrecht, Kluwer, 2002.
- [Courant e Friedrichs 1948] R. Courant e K. O. Friedrichs, *Supersonic flow and shock waves*, New York, Interscience, 1948.
- [Couturat 1905] Louis Couturat, *L'algebre de la logique*, Paris, Gauthier-Villars, 1905.
- [Craik 1943] Kenneth J. W. Craik, *The Nature of Explanation*, Cambridge, Cambridge University Press, 1943, ed. paperback 1964.
- [Craik 1947] Kenneth J. W. Craik, "Theory of the human operator in control systems. I. The operator as an engineering system", in *British Journal of Psychology*. General Section, Vol. 38, No. 2 (1947) (manoscritto ricevuto il 4 marzo 1945), pp. 56-61.
- [Craik 1948] Kenneth J. W. Craik, "Theory of the human operator in control systems. II. Man as an element in a control system", in *British Journal of Psychology*. General Section, Vol. 38, No. 3 (1948) (manoscritto ricevuto il 1° aprile 1945) pp. 142-147.
- [Craik 1966] Kenneth J. W. Craik, *The nature of psychology: a selection of papers, essays and other writings*. Edited by Stephen L. Sherwood. Cambridge University Press, London, 1966.
- [Crawford 1942] Perry Orson Jr. Crawford, *Automatic Control by Arithmentical Operations*, Tesi per il Master of Science, MIT 1942.
- [Creager e Santesmases 2006] Angela Creager e María Santesmases, "Radiobiology in the Atomic Age. Changing Research Practices and Policies in Comparative Perspective", in *Journal of the History of Biology*, vol. 39, No. 4, (2006).
- [Critchfield 1987] Charles Critchfield. Intervistato da William Aspray, 29 maggio 1987, OH 134, Los Alamos. NM, Charles Babbage Institute. The Center for the History of Information Processing, University of Minnesota, Minneapolis, Copyright, Charles Babbage Institute. Oral history database <http://special.lib.umn.edu/cbi/oh>.
- [Cull 2007] Paul Cull, "The mathematical biophysics of Nicolas Rashevsky", in *BioSystems* 88 (2007) pp. 178-184.
- [Cunningham et al. 1984] W. P. Cunningham, D. Freeman e J. F. McCloskey, "Of Radar and Operations Research. An Appreciation of A. P. Rowe (1898-1976)", in *Opns Res* 32 (1984), pp. 958-967.
- [D'Arcy 1942] Thompson D'Arcy, *On Growth and Form*, New York, The Macmillan Company, 1942.
- [Da Cruz 2010] Frank da Cruz, Columbia University Computing History. A Chronology of Computing at Columbia University, documento on line <http://www.columbia.edu/acis/history/index.html>, aggiornato al 28 settembre 2010.
- [Dahan Dalmedico et al. 1992] A. Dahan Dalmedico, J., L. Chabert e K. Chemla (cur.), *Chaos et déterminisme*, Paris, Éditions du Seuil, 1992.
- [Dallenbach 1946] Karl M. Dallenbach, "The Emergency Committee in Psychology. National Research Council", in *The American Journal of Psychology*, Vol. 59, No. 4 (Oct., 1946), pp. 496-582.
- [Davis 2000] Martin Davis, *The Universal Computer. The Road from Leibniz to Turing*, New York – London, W. W. Norton & C., 2000.
- [de Luca 2006] Aldo de Luca, "Some Reflections on Cybernetics and its Scientific Heritahe." *Scientiae Mathematicae Japonicae*, 64, No. 2 (2006), pp. 243-253, p. 245.
- [de Luca e Ricciardi 1986] Aldo de Luca e Luigi Maria Ricciardi, *Introduzione alla Cibernetica*, Milano, Franco Angeli, 1986.
- [Della Riccia e Wiener 1964] Giacomo Della Riccia e Norbert Wiener, "Random theory in classical phase space and quantum mechanics", in *Proceedings of the International Conference on Funcional Analysis*, MIT, Cambridge (Mass.), 9-13 giugno. Analysis in function space, pp. 3-14, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 1964. [WCW3], pp. 540-551.
- [Della Riccia e Wiener 1966] Giacomo Della Riccia e Norbert Wiener, "Wave mechanics in classical phase space, Brownian motion, and quantum theory", in *Journal of mathematics and physics*, 7 (1966), pp. 1372-1383. [CW3], pp. 552-563.
- [Den Hartog e Peters 1939] J. P. den Hartog and H. Peters (cur.), *Proceedings of the Fifth International Congress for Applied Mechanics*, held at Harvard University and the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, September 12-16, 1938, edited by J.P. den Hartog and H. Peters (one vol.), John Wiley and Sons, Inc., New York (USA), and Chapman and Hall Ltd., London (UK), 1939.
- [Dennis 1994] Michael Aaron Dennis, "Our First Line of Defense: Two University Laboratories in the Postwar American State", in *Isis*, 85/3 (Sep., 1994), pp. 427-455.

- [Dennis 2010] Michael Aaron Dennis, "Big Science", in *Britannica On Line*, 2010.
- [Derry e Williams 1960] Thomas K. Derry e Trevor I Williams, *A short history of technology*, Oxford, Clarendon Press, 1960; Id., *Storia della tecnologia. La tecnica e i suoi effetti economico-sociali*, Torino, Boringhieri, 1977, vol. II.
- [Desch 1942a] Joseph R. Desch to H. M. Williams, Vice-President, in Charge of Engineering & Research, NCR, 21 gennaio 1942, 9 pagg.; Inizialmente "confidential". fotoriproduzione dell'originale reperita sul sito: <http://www.daytoncodebreakers.org>. Il rapporto, senza titolo, ha per esplicito scopo "a brief history of the art, the objectives and accomplishments of our electrical research laboratory" [p. 1], essenzialmente dedicato alle ricerche su contatori e calcolatori elettronici.
- [Desch 1942b] Joseph R. Desch (N.C.R. Co.) "Memo of Present Plans for an Electro-Mechanical Analytical Machine", in 15 settembre 1942. Inizialmente classificato "Secret" (NARA) Record Group 38, Crane Library, File: CNSG 5750/441; pubblicato a cura di Ralph Erskine, Philip Marks e Frode Weiemd nel 29 novembre 2000, disponibile su <http://cryptocellar.web.cern.ch/cryptocellar/USBombe>
- [Desch e Mumma 1973] Joseph R. Desch e Robert Mumma. Intervistati da Henry Tropp, presso la NCR i giorni 17-18 gennaio 1973, Computer Oral History Collection 1969-1973, 1977. http://www.daytoncodebreakers.org/interview/interview_1.htm.
- [Dewey 1986] John Dewey, "The Reflex Arc Concept in Psychology", *Psychological Review*, 3 (1896), pp. 357-370.
- [Diner 1992] Simon Diner, "Les voies du chaos deterministe dans l'école russe", in [Dahan Dalmedico *et al.* 1992], pp. 331-370.
- [Douch 1947] E. J. H. Douch, *The use of servos in the army during the past war*, in «Journal of the Institution of Electrical Engineering Part IIA», 94 (1947), pp. 177-189.
- [Duffy] Robert A. Duffy, "Charles Stark Draper", in National Academy of Sciences, Biographical Memoirs, Washington, National Academy of Sciences, v. 65, pp. 122-159, 150.
- [Dupuy 1999] Jean-Pierre Dupuy, *Aux origine des sciences cognitives*, nuova edizione, Parigi, La Découverte, 1999.
- [EB97] *Encyclopedia Britannica* su CD, copyright 1996.
- [Eccles e Jordan 1919] W. H. Eccles e F. W. Jordan, "A Trigger Relay Utilising Three-Electrode Thermionic Vacuum Tubes", in *The Radio Review*, 1 (1919), p. 144.
- [Eckert 1940] Wallace John Eckert, *Punched card methods in scientific computation*, New York, The Thomas J. Watson Astronomical Computing Bureau, Columbia University, 1940.
- [Eckert *et al.* 1945] J. P. Eckert, J. W. Mauchly, H. Goldstine e J. G. Brainerd "Description of the ENIAC and Comments on Electronic Digital Computing Machines", in "Restricted", in prepared by the Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, NDRC AMP Memo 171.2R, November 30, 1945.
- [Eder 2010] Johann Eder, "Grand Challenges for Computer Science Research." In: R. Trappl, editor. *Cybernetics and Systems 2010*. Vienna, Austrian Society for Cybernetic Studies, 2010, pp. XIX-XXV.
- [Edler 1900] R. Edler, "Analytische und Graphische Bestimmung der Schaltungen im elektrischen Signalwesen" [Determinazione analitica e grafica dei circuiti nella segnalazione elettrica] *Mill. Technol. Gewerbemuseums*, Wien, 1900.
- [Einstein 1963] Albert Einstein, *Einstein on peace*, Londra, Methuen, 1963.
- [Eisenhower's Farewell address] Dwight D. Eisenhower, "Farewell address", in Discorso radio-televisivo del 17 gennaio 1961. "Dwight D. Eisenhower Presidential Library." www.archive.org/details/dde_1961_0117.
- [Emslie *et al.* 1948] A. G. Emslie, H.B. Huntington, H. Shapiro e A.E. Benfield, "Ultrasonic Delay Lines II", in *Journal of the Franklin stitute*, vol. 245 (1948), pp. 101-115.
- [Erenfest 1910] P. Erenfest, "Review of the Book by L. Couturat, The Algebra of Logic," in *Zhurnal Russ. Fiz.-Khim. Obshchestva*, Fizicheskoe Otdelenie, Vol. 42, No. 10, pp. 382-387 (Section 2) (1910).
- [Espenschied 1922] Lloyd Espenschied, "Application to Radio of Wire Transmission Engineering", in *Bell System Technical Journal*, Vol. 1, No. 2 (1922), pp. 117-141.
- [EST 1975] Scienza e tecnica dalle origini al Novecento. Annali dal 1700 al 1900, Vol. II. Mondadori EST, Milano 1975.
- [EST 1977] Scienza e tecnica del Novecento. Annali dal 1900 al 1950, Vol. I. Mondadori EST, Milano 1977.
- [Falcone 2010] Rino Falcone, "Le sfide della ricerca", in [Greco e Termini 2010], pp. 273-279.
- [Fantini 2000a] Bernardino Fantini, "Neurofisiologia e neurobiologia nel primo Novecento" [Rossi 2000], Vol. III: Il secolo ventesimo, Tomo II, pp. 479-491.
- [Fantini 2000b] Bernardino Fantini, "La neurobiologia" in [Rossi 2000], Vol. III: Il secolo ventesimo, Tomo II, pp. 1055-1077.
- [Farcot 1873] Joseph Farcot, *Le servo-moteur, ou, Moteur-asservi. Ses principes constitutifs, variantes diverses application à la manoeuvre des gouvernails*. Paris, J. Baudry, 1873
- [Fenyves e Somogyi 1997] E. J. Fenyves e A. Somogyi, "Obituary: Jean M. Barnothy, 1904-1996", in *Bulletin of the American Astronomical Society* ; vol. 29, no. 4 (1997), pp. 1467-1468.

- [Ferry e Saeks 1985] D. K. Ferry and R. E. Sacks, “Comments” a [Wiener 1985a], [Wiener 1985b], in *CW4*, pp. 137-140.
- [Feynman 1985] Richard Feynman, “Surely You’re Joking, Mr. Feynman!”, in New York, Norton & Company, 1985.
- [*First Draft*] John von Neumann, “First Draft of a Report on the EDVAC”, in Contract No. W-670-ORD-4926 between the United States Army Ordnance Department and the University of Pennsylvania. Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, June 30, 1945. Ciclostilato, di 101 pp., impresso solo sul verso. Fotoriproduzione pdf del documento originale della Smithsonian Institution Libraries (TIA).
- [Fitzpatrick 1999] Anne Fitzpatrick, “Igniting the Light Elements: The Los Alamos Thermonuclear Weapon. Project, 1942–1952.” Thesis. LA-13577-T. Issued: July 1999, “Approved for public release; distribution is unlimited.”
- [Flamm 1988] Kenneth Flamm, *Creating the computer. Government, industry, and high technology*, Washington, D.C., Brookings Institution, 1988.
- [Flichy 1994] Patrice Flichy, *Une histoire de la communication moderne. Espace public et vie privée*, Paris, La découverte, 1991; ID., *Storia della Comunicazione Moderna. Sfera pubblica e dimensione privata*, Bologna, Baskerville, 1994.
- [Flugel et al. 1948] J. C. Flugel, E. M. Goldberg e M. Cockett (cur.), *International Congress on Mental Health*, London, 1948. New York, Columbia University Press, 1948.
- [Forbush 1980] Scott E. Forbush, *Ernest Harry Vestine. 1906-1968. A Biographical Memoir*, Washington, D.C., National Academy of Sciences, 1980.
- [Forrester 1971] Jay Forrester. Intervistato da Richard R. Mertz, 20 gennaio 1971., in “Computer Oral History Collection, Archives Center, Smithsonian National Museum of American History.” Disponibile on line: <http://invention.smithsonian.org/>.
- [Frank et al. 1997] W. J. Frank, T. B. Cochran e R. S. Norris, “The Technology of War. Nuclear weapons”, in *EB97*.
- [Freguglia 1998] Paolo Freguglia (cur.), *Modelli matematici nelle scienze biologiche*, Grosseto, Ed. Quattro Venti, 1998.
- [Freitag-Loringhoff 1957] Bruno von Freitag-Loringhoff, “Eine Tübinger Rechenmaschine aus dem Jahre 1623”, in *Heimatkundliche Blätter für den Kreis Tübingen*, Vol. II, Parte 3, luglio 1957
- [Gabor 1965] Denis Gabor, “Wiener and the Art of Communication”, in [Mandrakar e P. R. Masani 1997], pp. 525-535. Comunicazione data da Gabor al “Wiener Memorial Meeting”, in Genova, 26-30 ottobre 1965.
- [Galison 1994] Peter Galison, “The Ontology of the Enemy: Norbert Wiener and the Cybernetic Vision”, in *Critical Inquiry*, 21/1, (1994), pp. 228-266.
- [Galison 1997] Peter Galison, *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics* (1997).
- [Galison e Hevly 1992] Peter Galison e Bruce Hevly (cur.), *Big Science: The Growth of Large-Scale Research* (1992)
- [Gamow 1938] George Gamow e Merle A. Tuve, “The Fourth Washington Conference on Theoretical Physics”, in 28 marzo 1938, Office of Public Relations, The George Washington University, <http://encyclopedia.gwu.edu>.
- [Gamow e Abelson 1946] George Gamow e Philip H. Abelson, “The ninth Washington Conference on Theoretical Physics”, in *Science*, Vol. 104 (1946), p. 574.
- [Gamow e Tuve s.d.] George Gamow e Merle A. Tuve, “The Fourth Washington Conference on Theoretical Physics”, in <http://encyclopedia.gwu.edu>.
- [Gardner 1985] Howard Gardner, *The mind’s new science*, New York, Basic Book, 1985.
- [Gardner Johnson 1996] Norman Gardner Johnson, “Explosives. Military Explosives. Shaped Charges”, in *EB97*.
- [Gerovitch 2002] Slava Gerovitch, *From Newspeak to Cyberspeak. A History of Soviet Cybernetics*, Cambridge, Mass., MIT Press, 2002.
- [Getting 1989] Ivan Getting, *All in a Lifetime: Science in the Defense of Democracy*, New York, Vantage Press, 1989, 121-127
- [Gladwin 1999] Lee A. Gladwin, “Cautious collaborators. The struggle for Anglo-American cryptanalytic co-operation 1940-43.” *Intelligence and National Security*, Vol. 14, No. 1 (1999), pp. 119-145.
- [Gladwin 2003] Lee A. Gladwin, “Alan M. Turing’s Contribution to Co-operation Between the UK and the US”, in [Teuscher 2003], pp. 463-474.
- [Gladwin 2003] Lee A. Gladwin “Alan M. Turing’s Contribution to Co-operation Between the UK and the US”, in Christof Teuscher (cur.), *Alan Turing. Life and legacy of a great thinker*, Springer, 2003, pp. 463-474.
- [Glimm et al. 1990] J. Glimm, J. Impagliazzo e I. Singer, (cur.), *The Legacy of John von Neumann. Proceedings of Symposia in Pure Mathematics*, Providence, Rhode Island, American Mathematica Society, 1990.
- [Goldstine 1973] Hermann H. Goldstine, *The computer from Pascal to von Neumann*, Princeton (New Jersey), Princeton University Press, 1973 (si cita dalla 2. ed. orig. 1980).

- [Goldstine 1977] Herman Goldstine. Intervistato da Nancy Stern, 14 marzo 1977, IAS, Princeton. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, www.aip.org/history/ohilist.
- [Goode 1969] Harry H. Goode, "Alston Scott Householder, 1969 Memorial Award Recipient." *IEEE Computer Society Awards*, 1969.
- [Greco 2010] Pietro Greco, "Progetto Mezzogiorno", in [Greco e Termini 2010] pp. 193-200.
- [Greco e Picardi 2005], Pietro Greco e Ilenia Picardi, *Hiroshima. La fisica riconosce il peccato*. Roma, Nuova Iniziativa Editoriale, 2005.
- [Greco e Termini 2010] Pietro Greco e Settimo Termini, *Memoria e Progetto. Un modello per il Mezzogiorno che serva a tutto il paese*, Monte San Pietro (BO), GEM, 2010.
- [Greenberg e Mitchell 1983] Jay R. Greenberg e Stephen A. Mitchell, *Object Relations in Psychoanalytic Theory*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1983; tr. it.: Id., *Le relazioni oggettuali nella teoria psicoanalitica*, Bologna, Il Mulino, 1994.
- [Grier 1996] David Grier, "The ENIAC, the Verb 'to program' and the Emergence of Digital Computers, *IEEE Annals of the History of Computing archive*, 18, 1 (March 1996), pp. 51-55.
- [Grinevald 1992] Cfr. Jacques Grinevald, *Come è nata l'idea di biosfera*, in P. Bunyard e E. Goldsmith (cur.), *L'ipotesi Gaia*, Como, RED edizioni, 1992, pp. 37-40.
- [Grosh 2003] Herbert R. J. Grosh, *Computer. Bit Slices From a Life*, copyright 1991, 2003. Edizione on line www.columbia.edu/acis/history/computer.pdf.
- [Guerlac 1987] Guerlac, *Radar in World War II*, New York, Pomash Publishers-American Institute of Physics, 1987.
- [Hagemeyer 1979] Friedrich-Wilhelm Hagemeyer, Die Entstehung von Informationskonzepten in der Nachrichtentechnik. Eine Fallstudie zur Theoriebildung in der Technik in dustrie und Kriegsforschung [L'emergenza del concetto di informazione nell'ingegneria delle telecomunicazioni. Un case study sulla elaborazione teorica nella tecnologia industriale e nella ricerca militare], Tesi di dottorato presso la Freie Universität Berlin, FB 11: Philosophie und Sozialwissenschaften, 8 novembre 1979.
- [Hall 1947] Albert Hall, *The Analysis and Synthesis of Linear Servomechanisms*, ristampa MIT press 1947.
- [Harman 1982] Harry Horace Harman, *Energy, force, and matter. The conceptual development of nineteenth-century physics*. Cambridge, Cambridge University press, 1982.
- [Harrison 1932] George R. Harrison, "Mechanical aid to the analysis of complex spectra", in *Review of Scientific Instruments*, vol. 3 (1932), pp. 753-759.
- [Hartree 1940] D. R. Hartree, "The Bush Differential Analyzer and Its Applications", in *Nature*, vol. 146 (1940), pp. 319-323.
- [Hartree 1949] D. R. Hartree, D. R., *Calculating instruments and machines*, Urbana, University of Illinois Press, 1949.
- [Hartree 1952] D. R. Hartree, *Numerical analysis*, Oxford : Clarendon, 1952.
- [Hawkins 1946] David Hawkins, Manhattan District History Project Y. The Los Alamos Project. Vol. I.: inception until August 1945. Los Alamos, New Mexico, Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1946. Report written 1946. Distributed December 1, 1961. Fonte: US Department of Energy. <http://www.cfo.doe.gov>.
- [Hazen 1934a] Harold Hazen, "Theory of servomechanisms", in *Journal of the Franklin stitute*, 218 (1934), pp. 279-331, pp. 543-580
- [Hazen 1934b] Harold Hazen, "Design and test of high performance servomechanism", in *Journal of the Franklin stitute*, 218 (1934), pp. 543-580.
- [Hazen's The Human Being] Harold L. Hazen, "The Human Being as a Fundamental Link in Automatic Control Systems", in lettera/memorandum inviata a Weaver, Warren, 13 maggio 1941, OSRD 7 Office file of Warren Weaver MIT General Folfer, box 70. Stralci sono citati da [Bennett 1993, p. 167-168]; [Mindell 1996, p. 441]; [Mindell 2002, p. 276 e nota 1 p. 383].
- [Heims 1975] Steve J. Heims, "Encounter of behavioral sciences with new machine-organism analogies in the 1940s", in *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, 11 (1975), pp. 368-373.
- [Heims 1977] Steve J. Heims., "Gregory Bateson and the mathematicians. From interdisciplinary interaction to societal functions", in *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, 13 (1977), pp. 141-159.
- [Heims 1980] Steve J. Heims, *John von Neumann and Norbert Wiener. From Mathematics to the Technologies of Life and Death*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1980; si cita dalla 2. ristampa paperback, 1984.
- [Heims 1991] Steve J. Heims, *Constructing a Social Science for Postwar America. The Cybernetics Group. 1946-1953*. Cambridge, Mass., MIT Press, 1991; tr. it.: Id., *I cibernetici. Un gruppo e un'idea*, Roma, Editori Riuniti, 1994.
- [Heims 1993] Steve J. Heims, "Introduction" a Wiener (1993).
- [Hellman 1981] Walter Daniel Hellman, Norbert Wiener and the growth of negative Feedback in scientific explanation; with a proposed research program of "cybernetic analysis". Tesi per il Ph.D., Oregon State University, Completed December 16, 1981.

- [Henderson 1913] Lawrence J. Henderson, *The fitness of the environment. An inquiry into the biological significance of the properties of matter*, New York, Macmillan, 1913.
- [Hoare e Milner, 2005] Tony Hoare e Robin Milner, "Grand Challenges for Computing Research." *The Computer Journal* 48(1), 2005.
- [Hodges 1983] Andrew Hodges, *Alan Turing. The enigma*. New York, Simon and Schuster, 1983; tr. it.: Id., *Storia di un enigma. Vita di Alan Turing (1912-1954)*, Torino, Boringhieri, 1991.
- [Holland 2011] James Holland, *The Battle of Britain. Five months that changed history, May-October 1940*, New York, St. Martin's Press, 2011.
- [Holland e Husbands 2008] Philip Husbands and Owen Holland, "The Ratio Club. A Hub of British Cybernetics", in [Husbands *et al.* 2008], pp. 91-148.
- [Holland e Husbands 2011] Owen Holland e Phil Husbands, "The origins of British cybernetics: the Ratio Club", in *Kybernetes*, Vol. 40 No. 1/2 (2011), pp.110-123.
- [Hollcroft 1940] T. R. Hollcroft, "The Summer Meeting in Hanover", in *Bulletin American Mathematical Society*, 46/11 November (1940), pp. 859-868.
- [Holst 1961] A. Holst, "Bibliography on Switching Circuits and Logical Algebra", in *Ire Transaction on Electronic Computers*, Vol.: EC-10 No. 4 (1961), pp. 638-661.
- [Hongsen 1996] Wei Hongsen, "Norbert Wiener at Qinghua University" in *Journal of Dialectics of Nature II*, 1 (1980), pp. 60-63, ora in *Boston studies in the philosophy of science*, v. 179 (1996), pp. 447-451.
- [Hook *et al.* 2002] Diana H. Hook, Jeremy M. Norman e Michael R. Williams, *Origins of cyberspace. A library on the history of computing, networking, and telecommunications*. Novato, Calif., History of science.com, 2002.
- [Householder e Landhal 1945] Alston S. Householder e Herbert D. Landhal, *Mathematical Biophysics of the Central Nervous System*, Bloomington, Indiana, The Principia Press, 1945.
- [Howlet 1995] Estratto di una lettera di Jack Howlet a Jim Hailstone dell'11 novembre 1995, della quale è stato pubblicato un "excerpt" sul sito <http://www.chilton-computing.org.uk>.
- [Hull 1929] Albert Wallace Hull, "Hot-cathode thyatrons", *General Electric Review.*, 32: (1929) pp. 213-23, 390-99.
- [Hunsaker e von Karman 1939] Jerome C. Hunsaker e Theodor von Karman, "Report of the Segretaries", in [Den Hartog e Peters 1939], pp. XVII-XXII.
- [Husbands *et al.* 2008] Philip Husbands, Owen Holland e Michael Wheeler (cur.), *The Mechanical Mind in History*, Cambridge, Mass. - London, England, MIT Press, 2008.
- [Irvine 2001] M. M. Irvine, "Early Digital Computers at Bell Telephone Laboratories", in *IEEE Annals of the History of Computing*, 23/3 (2001), pp. 22-42.
- [Israel 1998] Giorgio Israel, "Balthazar Van der Pol e il primo modello matematico del battito cardiaco", in [Freguglia 1998] pp. 133-162.
- [Israel e Ana Gasca 2008] Giorgio Israel e Ana Millan Gasca, *Ana, Il mondo come gioco matematico. La vita e le idee di John von Neumann*, Torino, Bollati Boringhieri, 2008; tr. engl. Id., *The world as a mathematical game. John von Neumann and 20. century science*, Basel etc., Birkhauser, 2009.
- [Jeffress 1951] Lloyd A. Jeffress (cur.), *Cerebral Mechanisms in Behavior. The Hixon Symposium*, New York - London, Wiley and Sons - Chapman & Hall, 1951.
- [JNMD 1965] «The Journal of Nervous and Mental Disease», vol. 140, n. 1 (1965), serial no. 986. Edizione in *Memoriam* dedicata in gran parte a Wiener.
- [Johnston 2001] Sean F. Johnston, *A History of Light and Colour Measurement. Science in the Shadows*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2001.
- [Joseph Henry Woodger] "Woodger, Joseph Henry (1894-1981)" *Encyclopedia of Philosophy*, London, Macmillan, 2006.
- [Juley 1947] Joseph Juley, "The Ballistic Computer", in *Bell Laboratories Record*, 24, (1947) pp. 5-9.
- [Jung 2005] Walter G. Jung, *Op Amp Applications Handbook*. Newnes, Burlington, MA, c2005.
- [Kalin 1952] Theodore A. Kalin, "Formal logic and switching circuits." *Proceedings of the Association for Computing Machinery*, Jointly sponsored by the Association for Computing Machinery and the Mellon Institute, Pittsburgh, Pa., May 2 and 3, 1952, photo-offset, Richard Rimbach Associates, Pittsburgh 1952, pp. 251-257.
- [Kautz 1966] William H. Kautz, "A Survey and Assessment of Progress in Switching Theory and Logical Design in the Soviet Union" *IEEE Transactions on Electric Computers*, Vol. EC-15, No. 2 APRIL 1966, 164-204.
- [Kavanagh e Hall] John Kavanagh e Wendy Hall (cur), *Grand Challenges in Computing Research, GCCR'08 Final Report Updated January 2009*, <http://www.ukcrc.org.uk/grand-challenge/index.cfm>.
- [Kay 1997] Lily E. Kay, "Cybernetics, information, life. The emergency of scriptural representations of heredity", in *Configurations*, 5 (1997), pp. 23-91.
- [Kay 2001] Lily E. Kay, *Who wrote the book of life? A history of the genetic code*, Stanford, Stanford University press, 2000.

- [Kester 2004] Walter Allan Kester e Analog Devices, Inc., *Data Conversion Handbook*, Newnes, 2004.
- [Kevles e Hood 1992] Daniel J. Kevles e Leroy Hood (cur.), *The Code of Codes: Scientific and Social Issues in the Human Genome Project* (1992).
- [King 1923] Robert W. King, "Thermionic Vacuum Tubes and Their Applications", in *Bell System Technical Journal*, vol. 2, 4 (1923), pp. 31-100.
- [Kipling 1899] Rudyard Kipling, *From Sea to Sea. Letters of Travel*, New York, Doubleday McClure Company, 1899, Vol. II.
- [Kirby e Capey 1997] M. Kirby e R. Capey, "The Air Defence of Great Britain, 1920-1940: An Operational Research Perspective", in *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 48, No. 6 (Jun., 1997), pp. 555-568.
- [Kleene 1951] S. C. Kleene, "Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata", U.S. Air Force Project Rand, Research Memorandum, MR-704, 15 Dicembre 1951, 98 pagine.
- [Kleene 1956] S. C. Kleene in [Shannon e McCarthy 1956], pp. 3-41, versione riveduta di [Kleene 1951].
- [Klein 1991] Lawrence Klein (cur.) "The Statistics Seminar, MIT, 1942-1943", in *Statistical Science*, v. 6, No. 4 (1991)
- [Koistinen 1965] Paul A. C. Koistinen, *The Hammer and the Sword: Labor, the Military, and Industrial Mobilization. 1920-1945*, New York, Arno Press, 1965.
- [Koistinen 1980] Paul A. C. Koistinen, *The Military-Industrial Complex: A Historical Perspective*, New York, Praeger, 1980.
- [Koistinen 1998] Paul A. C. Koistinen, "Reviews of [Zachary 1997]", in *Reviews in American History*, 26/3 (1998), pp. 606-613.
- [Koistinen 2004] Paul A. C. Koistinen, *Arsenal of World War II. The Political Economy of American Warfare, 1940-1945*, Lawrence, Kan, University Press of Kansas, 2004.
- [Kolbe 1893] Kolbe, "Das Entwerfen von Umschalt-Einrichtungen" [Progettazione di circuiti a commutazione], *Z. Mektrotech.*, Vol. 11, No. 1, 5, 1893.
- [Konopiski et al. 1946] Emil Konopiski, Cloyd Heck Marvin e Edward Teller, "Ignition of the atmosphere with the nuclear bombs", in Los Alamos National Laboratory, 14 agosto 1946.
- [Kuhn 1970] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, The University of Chicago Press, 1970.
- [Lavoisier 1774] Antoine Laurent Lavoisier, *Prix proposé par l'Académie des Sciences pour l'année 1774*, <http://www.lavoisier.cnrs.fr>
- [Lécuyer 1998] Christophe Lécuyer, "Academic Science and Technology in the Service of Industry. MIT Creates a 'Permeable' Engineering School", in *The American Economic Review*, Vol. 88-2 (1998), pp. 28-33.
- [Lee et al. 2000] John A. N. Lee, Colin Burke e Deborah Anderson, "The US Bombes, NCR, Joseph Desch, and 600 WAVES: The First Reunion of the US Naval Computing Machine Laboratory", in *IEEE Annals of the History of Computing*, 22/3 (2000), pp. 27-41, basato sulle relazioni tenute ad un convegno del «Naval Computing Machine Laboratory», in svoltosi tra il 14 e il 17 settembre 1995, presso Dayton, Ohio.
- [Lee] Yuk-Wing Lee, Tesi di MS, MIT "Synthesis of Electric Networks by Means of the Fourier Transforms of Laguerre's Functions".
- [Leibniz, *Machina aritmetica*] Leibniz, "Machina aritmetica in qua non additio tantum et subtractio sed et multiplicatio nullo, divisio vero paene nullo animi labore peragantur." Manoscritto del 1685, pubblicato in glese in Smith (1929).
- [Lepschy 1998] Antonio Lepschy, "Interdisciplinarietà e metadisciplinarietà dai punti di vista dell'ingegneria dell'informazione e della Cibernetica", in *Accademia e Interdisciplinarietà I: Saggi*, Padova, Accademia Galileiana di Scienze, Lettere ed Arti, 1998.
- [Leslie 1992] Stuart W. Leslie, *The Cold War and American Science: The Military-Industrial-Academic Complex at MIT and Stanford*, New York, Columbia University Press, 1992.
- [Lettvin 2000] Jerome Y. Lettvin. Intervista, 2 giugno 1994, con materiale aggiunto nel 1997, in [Anderson e Rosenfeld 2000], pp. 2-3.
- [Lettvin e Pitts 1943] Jerome Y. Lettvin e Walter Pitts. "A mathematical theory of the affective psychoses." *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, (1943), pp. 139-148.
- [Lettvin et al. 1959] J. Y. Lettvin, H. R. Maturana, W. S. McCulloch, e W. H. Pitts, "What the frog's eye tells the frog's brain", in *Proceedings of the IRE*, Vol. 47, No. 11, November (1959), pp. 1940-1951.
- [Levinson 1966] Norman Levinson, "Wiener's Life", in [BAMS 1966], pp. 1-32.
- [Lewis 1942] Lewis, W. Bennet, *Electrical counting: with special reference to counting Alpha and Beta particles*, 1942; 2. ed. Cambridge, The university press, 1948.
- [Lewis 1991] Frank D. Lewis, Intervistato da Andrew Goldstein, 12 June 1991, IEEE History Center, Interview # 088 for the IEEE History Center, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Oral-History:Frank_Lewis
- [Lipset 1982] David Lipset, Gregory Bateson. *The legacy of a scientist*. Boston, Beacon Press, 1982.

- [Lischke 1921] R. Lischke, "Schaltlehre. Anleitung zur Ansmittlung von Schaltungen elektrischer Einrichtungen" [Teoria della commutazione. Manuale per lo sviluppo di circuiti a commutazione nei sistemi elettrici], Leipzig, Verlag Hachmeister und Thal, 1911; 3rd ed., 1921.
- [Locke e Booth 1955] William N. Locke e A. Donald Booth (cur.), *Machine translation of languages: fourteen essays*, Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1955.
- [Locke e Booth 1955] William N. Locke e A. Donald Booth (cur.), *Machine translation of languages: fourteen essays*, Boston - New York, Mit Press, Cambridge, Mass. - John Wiley & Sons, Inc., 1955.
- [Longo B. 2004] Bernadette Longo, "Edmund Berkeley, Computers, and Modern Methods of Thinking", in *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 26, no. 4 (2004), pp. 4-18.
- [Lorente De No 1938] R. Lorente de No, "Analysis of the activity of the chains of internuncial neurons", in *Journal of Neurophysiology*, 1 (1938), 207-244.
- [Lotka 1925] A. Lotka, *Elements of physical biology*, Baltimora, MD, Williams and Wilkins, 1925.
- [Lovell 1947] C. A. Lovell, "Continuous Electrical Computation", in *Bell Laboratories Record* 24 (no. 3) March 1947.
- [Luebbert e Stoll 1977] W. F. Luebbert e E.L. Stoll, "Colossus and the Ultra Secret." *Abacus*, giugno 1977, pp. 11-21.
- [Lyapunov 1892] Aleksandr M. Lyapunov, *Obshcheia zadacha ob ustoichivosti dvizheniia* 1892; tr. ingl.: Id. *The general problem of the stability of motion*, a cura di A.T. Fuller, London - Washington, DC, Taylor & Francis, 1992.
- [MacColl 1945] LeRoy A. MacColl, *Fundamental theory of servomechanisms*, New York, Van Nostrand, 1945.
- [Macy 10] Heinz von Förster et al. (cur.), *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems*. Transactions of the 10th Conference, april 22, 23 and 24 1953. Princeton, NJ, New York, Josiah Macy, Jr. Foundation, 1955.
- [Macy 6] Heinz von Förster et al. (cur.), *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems*. Transactions of 6th Conference, 1949, March 24-25, 1949, New York, Josiah Macy, Jr. Foundation, 1950.
- [Macy 7] Heinz von Förster et al. (cur.), *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems*. Transactions of 7th Conference, March 23-24, 1950, New York, Josiah Macy, Jr. Foundation 1951.
- [Macy 8] Heinz von Förster et al. (cur.), *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems*. Transactions of the 8th Conference, March 15-16, 1951, New York (N.Y.), New York, Josiah Macy, Jr. Foundation, 1952.
- [Macy 9] Heinz von Förster et al. (cur.), *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems*. Transactions of the 9th Conference, March 20-21, 1952, New York (N.Y.). New York, Josiah Macy, Jr. Foundation, 1953.
- [Madge 1962] John Madge, *The Origins of Scientific Sociology*, New York, The Free Press of Glencoe, 1962.
- [Mandelbrojt 1973] S. Mandelbrojt, "Avant-propos", in *L'Analyse Harmonique dans le Domaine Complexe*, Berlin - Heidelberg, Springer, 1973, 1-4.
- [Mandrakar e Masani 1997] V. Mandrakar e P. R. Masani (cur.), *Proceedings of the Norbert Wiener Centenary Congress, 1994*, Michigan State University November 27-December 3, 1994, Providence, Rhode Island, American Mathematical Society, 1997.
- [Marchetti 1999] G. Marchetti (cur.), *Il neopragmatismo*, Firenze, La Nuova Italia, 1999.
- [Martin 1925] Martin Ernst *Die Rechenmaschinen und ihre Entwicklungsgeschichte*. Pappenheim, Johannes Meyer, 1925; tr. Engl: ID., *Die Rechenmaschinen. The calculating machines. Their history and development*, trans. by P. Aldrich Kidwell and M. R. Williams, Cambridge, Mass., MIT Press and Tomash Publishers, 1992.
- [Masani 1987] Pesi R. Masani, "Norbert Wiener and the Computer", in *Annals of the History of Computing* 9/2 (1987), pp. 183-185.
- [Masani 1990] Pesi R. Masani, *Norbert Wiener. 1894-1964*, Basel - Boston - Berlin, Birkhäuser Verlag, 1990.
- [Masani e Phillips 1985] Pesi R. Masani e R. S. Phillips, *Antiaircraft Fire-Control and the Emergence of Cybernetics*, in [WCW4], pp. 141-179.
- [Masani et al. 1987] Pesi R. Masani et al., "The Wiener Memorandum on the Mechanical Solution of Partial Differential Equations", in *Annals of History of Computing* 9 (1987), pp. 183-197.
- [Mason 1953a] Samuel J. Mason, "Feedback theory. Some properties of signal flow graphs", in *Proceeding of the I.R.E.*, 1953, 41, pp. 1144-56.
- [Mason 1953b] Samuel J. Mason, "Feedback Theory. Further Properties of Signal Flow Graphs", in *Proceeding of the I.R.E.*, 1953, 41, pp. 1144-56.
- [Massey et al. 1938] H. S. W. Massey, J. Wylie, R. A. Buckingham e R. Sullivan, "A Small Scale Differential Analyzer - Its Construction and Operation", in *Proc. Royal Irish. Acad.*, vol. XLV (1938), pp. 1-21.

- [Maurizi 2004] Maurizi, Stefania, *Una bomba, dieci Storie. Gli Scienziati e l'atomica*, Bruno Mondadori, Milano 2004.
- [Maxwell 1859] J. Clerk Maxwell, "On the stability of the motion of Saturn's rings. An essay, which obtained the Adams prize for the year 1856", in The University of Cambridge, Cambridge MacMillan and Co., 1859, Ripubblicato in Id., *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, Edited by W. D. Niven, New York, Dover Publications, 1965, vol. I, pp. 288- 376.
- [Maxwell 1868] J. Clerk Maxwell, "On Governors", in *Proceedings of the Royal Society*, 100 (1868).
- [Mayr 1969] Otto Mayr, *Zur Frühgeschichte der Technischen Regelungen*, München, Oldenbourg Verlag, 1969; tr. ingl.: Id., *The Origins of Feedback Control*, Cambridge (Mass.) e London (Engl.), Mit Press, 1970.
- [Mayr 1971] Otto Mayr, "Maxwell and the Origins of Cybernetics", in *Isis*, 62, 4 (1971), pp. 425-444.
- [McC. Brooks et al. 1975a] Chandler McC. Brooks, Kiyomi Koizumi, and James O. Pinkston. *The Life and Contributions of Walter Bradford Cannon, 1871-1945: His Influence on the Development of Physiology in the Twentieth Century* edited by Chandler McC. Brooks, Kiyomi Koizumi, and James O. Pinkston (symposium, Brooklyn, NY, May 1972), 264 pp, with illus, \$20, Albany, State University of New York Press, 1975.
- [McC. Brooks et al. 1975b] Chandler McC. Brooks, Kiyomi Koizumi, and James O. Pinkston, "The Breadth of Walter B. Cannon's Interests", in [McC. Brooks et al. 1975a] pp. 170-185.
- [McCulloch 1960] Warren S. McCulloch, "What Is a Number, that a Man May Know It, and a Man, that He May Know a Number?", in The Ninth Alfred Korzybski Memorial Lecture, *General Semantics Bulletin*, Numeri 26 e 27 (1960); ripubblicato in Warren S. McCulloch, *Embodiments of mind*. Cambridge, MA, The MIT press, 1965, pp. 1-18.
- [McCulloch 1965] Warren S. McCulloch, *Norbert Wiener and the art of theory*, in [JNMD 1965], p. 16.
- [McCulloch 1974] Warren S. McCulloch, "Recollections of the Many Sources of Cybernetics", in *ASC Forum*, Vol. 6, No 2 (1974), pp. 5-16.
- [McCulloch e Pitts 1943] McCulloch, Warren - Pitts, Walter "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", in *Bull. Math. Biophys.* 5(1943), 115-133.
- [McCulloch's Summary] Warren McCulloch, *To the members of the conference on teleological mechanisms - Oct. 23 & 24, 1947*, dattiloscritto ciclostilato di 9 pagine. In MCAPS. Series II. Conferences and publications, 1931-1992. Macy Meeting I, VII 1946 - ; BOX 19 - Library of the American Philosophical Society di Philadelphia. Si tratta di un riassunto dattiloscritto dei primi tre Convegni Macy, preparato da McCulloch ad uso dei partecipanti al quarto incontro svoltosi nei giorni 23-24 ottobre 1947. Ringrazio l'APS ed in particolare Robert S. Cox per avermi gentilmente inviato le fotocopie del documento).
- [MDL 1947a] MDL, Review di [Stibitz 1945a] in *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, vol. 2, No. 20 (Oct., 1947), pp. 364-365.
- [MDL 1947b] MDL, Review of [Eckert et. al. 1945] in *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, vol. 2, No. 20 (Oct., 1947), pp. 364-365.
- [Mead 1968] Margaret Mead, *Cybernetics of cybernetics*, in [Von Förster 1968], p. 1.
- [Mead e Bateson 1976] Margaret Mead e Gregory Bateson, "For God's Sake, Margaret", intervista di Stewart Brand, *CoEvolution Quarterly* Summer 1976, reperito sul sito web <http://wholeearth.com/>.
- [Metropolis 1987] Nicolas C. Metropolis, OH 135, intervista condotta da William Aspray il 29 maggio 1987, Los Alamos (NM) Charles Babbage Institute. The Center for the History of Information Processing, University of Minnesota, Minneapolis, Charles Babbage Institute. Oral history database <http://special.lib.umn.edu/cbi/oh>.
- [Metropolis e Nelson 1982] N. Metropolis e E. C. Nelson, "Early Computing at Los Alamos", in *Annals of the History of Computing*, Vol. 4, Number 4, Ottobre 1982.
- [Metropolis et al. 1980] N. Metropolis, J. Howlett e G.C. Rota (cur), *A History of Computing in the Twentieth Century*, New York, Academic Press, 1980.
- [Milsum 1968] J. H. Milsum (cur.), *Positive feedback. A general systems approach to positive/negative feedback and mutual causality*, Oxford etc., Pergamon press, 1968.
- [Mindell 1995a] David A. Mindell, "Anti-Aircraft Fire Control and the Development of Integrated Systems at Sperry. 1925-1940", in *IEEE Control Systems*, 15/2, April (1995) pp. 108-113.
- [Mindell 1995b] David A. Mindell, "Engineers, Psychologists, and Administrators: Control Systems Research in Wartime, World War 1940-1945", in *IEEE Control Systems Magazine*, v. 15/4 (1995), pp. 91-99.
- [Mindell 1995c] David A. Mindell, "Automation's Finest Hour: Bell Labs and Automatic Control in World War II", in *IEEE Control Systems*, 15/6 (1995), pp. 52-80, p. 75.
- [Mindell 1996] David A. Mindell, A., *Datum for its own Annihilation. Feedback, control, and computing. 1916-1945*. Dissertazione di Ph.D. presso l'MIT, 1996.
- [Mindell 2002] David A. Mindell, *Between human and machine. Feedback, control and computing before cybernetics*, Baltimora, The John Hopkins University Press, 2002.
- [MIT 2002a] "Mining engineer Leroy Foster dies at age 99" *MIT Tech Talk*, January 9, 2002, versione on line <http://web.mit.edu/press/2002/foster-0109.html>

- [MIT 2002b] “Retired Professor F. Leroy Foster dies at 99. Helped manage World War II research at MIT” on line <http://web.mit.edu/press/2002/foster.html>.
- [MIT Norton] Documento “Charles L. Norton”, in <http://web.mit.edu/hmtl/www/norton.html>.
- [Montagnini 1999-2000] Leone Montagnini, “Bit & Plutonium, inc. Le relazioni tra Norbert Wiener e John von Neumann alle origini della Cibernetica”, in *Atti dell'IVSLA*, 158 (1999-00), Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, fascicolo II, pp. 361-390.
- [Montagnini 2000] Leone Montagnini, “Cibernetica e guerra fredda”, in *Ácoma. Rivista Internazionale di Studi Nordamericani*, n. 19, primavera estate (2000), pp. 76-84.
- [Montagnini 2000-2001] Leone Montagnini, “Norbert Wiener e le scienze sociali. Il qualitativismo metodologico di un matematico”, in *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali*, n. 159 (2000-2001), fascicolo III, pp. 469-501.
- [Montagnini 2001] Leone Montagnini, “Il bello della scienza. Aspetti qualitativi nel pensiero matematico”, in *Oikos*, 12 (2001), pp. 39-52.
- [Montagnini 2001-2002a] Leone Montagnini, “Gli occhiali nuovi di un matematico. Il periodo filosofico di Norbert Wiener”, in *Atti e memorie dell'Accademia Galileiana di Scienze, Lettere ed Arti già dei Recovrati e Patavina*, in v. 114 (2001-02), parte II: Memorie della Classe di Scienze Matematiche e Naturali, pp. 55-86.
- [Montagnini 2001-2002b] Leone Montagnini, *La rivoluzione Cibernetica. L'evoluzione delle idee di Norbert Wiener sulla scienza e la tecnica*, in «Atti e memorie dell'Accademia Galileiana di Scienze, Lettere ed Arti», v. 114 (2001-02), parte II: Memorie della Classe di Scienze Matematiche e Naturali, pp. 109-135.
- [Montagnini 2005] Leone Montagnini, *Le Armonie del Disordine. Norbert Wiener Matematico-Filosofo del Novecento*, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, 2005.
- [Montagnini 2007] Leone Montagnini, “Looking for a ‘scientific’ social science: the Macy Conferences on Cybernetics in Bateson’s itinerary”, in *Kybernetes*, n. 36, 7/8 (2007), pp. 1012-1021.
- [Montagnini 2007b] Leone Montagnini, *From Pragmatism to Cybernetics, via Qinghua University. Remarks on Norbert Wiener’s epistemological thought*, relazione tenuta l’11 agosto 2007 al “CLMPS 2007”, in 13th International Congress of Logic Methodology and Philosophy of Science, Tsinghua University, Beijing, China, August 9-15, 2007.
- [Montagnini 2008] Leone Montagnini, “Philosophical Approaches towards Sciences of Life in Early Cybernetics”, in L. M. Ricciardi, A. Buonocore ed E. Pirozzi (cur.), *Collective Dynamics on Competition and Cooperation in Biosciences. A Selection of Papers in the Proceedings of BIOCOMP2007 International Conference. Vietri Sul Mare, Italy, 24-28 September 2007*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1028, American Institute of physics, Melville – New York, pp. 11-17.
- [Montagnini 2009] Leone Montagnini, “La questione della forma della Terra. Dalle origini alla Tarda Antichità”, in *Studi sull'Oriente Cristiano*, Vol. 13, No. 2 (2009), pp. 31-68.
- [Montagnini s.d.] Leone Montagnini, “Interdisciplinary issues in Early Cybernetics,” in C. Pléh, L. Gurova e L. Ropolyi (cur.), *New Perspectives on the history of cognitive science*, Budapest, Akadémiai Kiadó, in corso di pubblicazione.
- [Montagnini 2010] Leone Montagnini, “Identities and Differences. A stimulating aspect of Early Cybernetics”, in R. Trappl (cur.), *Cybernetics and Systems 2010*, Vienna, Austrian Society for Cybernetic Studies, 2010.
- [Morelli 2001] Marcello Morelli, *Dalle calcolatrici ai computer degli anni Cinquanta. I protagonisti e le macchine della storia dell'informatica*, Milano, Angeli, 2001.
- [Morin 1991] Edgar Morin, *Le vie della complessità*, in [Bocchi – Ceruti 1991]
- [Morse 1940a] Marston Morse, “Report of the War Preparedness Committee of the American Mathematical Society and Mathematical Association of America at the Hanover meeting”, in *Bulletin of the American Mathematical Society*, 46-9, settembre, (1940), Part 1: 711-714.
- [Morse 1940b] Marston Morse, “Report of the War Preparedness Committee”, in *American Mathematical Monthly*, 47/7 (1940), pp. 500-502.
- [Morse e Hart 1941] Marston Morse e William Hart, “Mathematics in the Defence Program”, in *American Mathematical Monthly*, 48 (1941), pp. 293-302, p. 296.
- [Nagy et al. 1987] Dénes Nagy, Ferenc Nagy e Péter Horvát. 1987. *The Computer, the Brain, and the Missing Link* (In Memoriam John von Neumann). Budapest-Tempe, National Technical Information Centre and Library, 1987.
- [Nagy et al. 1989] Dénes Nagy, Péter Horvát, and Ferenc Nagy, “The von Neumann-Ortvay Connection”, in *Annals of the History of Computing*, Vol. 11, No. 3 (1989), pp. 183-188.
- [Nakashima 1936] Akira Nakashima, “The theory of relay circuit composition”, in *Nippon Electrical Communication Engineering*, No. 3, May 1936, 197-226.
- [Nathan e Norden 1968] O. Nathan e H. Norden (cur.) *Einstein on Peace*, New York, Schocken, 1968.
- [News from Washington University 1946] Anon, “News Release from the George Washington University and the Carnegie Institution of Washington Theoretical Physics meet with biologists for study of living processes”,

- Washington, D. C., November 2, 1946 Office of Public Relations, The George Washington University. University Archives <http://encyclopedia.gwu.edu/gwencyclopedia>, reperita in rete il 24/5/2011.
- [Nof 2009] Shimon Y. Nof (Cur.), *Springer Handbook of Automation*, Springer, Berlin Heidelberg 2009.
- [Nora e Minc 1978] S. Nora - A. Minc, *L'informatisation de la société*, Paris, La documentation française, 1978.
- [NV 1940] "New and Views. US NDRC" *Nature*, 10 (1940), august, p. 191.
- [Nyce e Kahn 1991a] James M Nyce, e Paul Kahn (cur.), *From Memex to hypertext. Vannevar Bush and the mind's machine*, Boston, Academic Press, 1991; tr.it.: ID., *Da Memex a Hypertext. Vannevar Bush e la macchina della mente*, Padova, Muzzio, 1992.
- [Nyce e Kahn 1991b] James M. Nice e Paul Kahn, *Una macchina per la mente: il Memex di Vannevar Bush*, in [Nyce e Kahn 1991a], pp. 3-24.
- [Nyquist 1932] H. Nyquist, "Regeneration Theory", in *Bell System Technical Journal*, Vol. 11, 1932, pp. 126-147.
- [O'Connor e Robertson (1999)] J. J. O'Connor e E. F. Robertson July 1999 *MacTutor History of Mathematics*;
- [Obituary: J. G. Dusser de Barenne] Obituary: J. G. Dusser de Barenne, *Journal of Nervous & Mental Disease*, Vol. 92 - No. 2 (1940), pp. 274-275.
- [Oliver et al. 1948] B. M. Oliver, J. R. Pierce e C. Shannon, "The Philosophy of PCM", in *Proceedings Institute of Radio Engineers*, Vol. 36 (1948), pp. 1324-1331
- [Osipenko e Farr 2004] Leeza Osipenko e John Vail Farr, "System Dynamics and Dynamic Systems Integration in Regulatory Environments", in 2004, presentato in *System Dynamics Society. 22nd International Conference July 25-29, 2004, Oxford, UK*, in http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004.
- [Owens 1986] Larry Owens, "Vannevar Bush and the Differential Analyzer. The Text and Context of an Early Computer", in *Technology and Culture*, Vol. 27, No. 1 (1986), pp. 63-95.
- [Owens 1988] Larry Owens, "Mathematicians at war. Warren Weaver and the Applied Mathematics Panel, 1942-1945", in [Rowe e McCleary 1988], pp. 286-305.
- [Owens 1996] Larry Owens, "Where Are We Going, Phil Morse? Changing Agendas and the Rhetoric of Obviousness in the Transformation of Computing at MIT, 1939-1957", in *IEEE Annals of the History of Computing archive*, Vol. 18 No. 4, December (1996).
- [Paley e Wiener 1934] R.E.A.C. Paley e Norbert Wiener, *Fourier transforms in the complex domain*, "American Mathematical Society Colloquium Publications", in vol. 19, New York, AMS, 1934.
- [Pearson 1892] Karl Pearson, *The Grammar of Science*, London, Walter Scott, 1892, pp. 53-55. Riprendo da Jérôme Segal le indicazioni dei libri di Pearson e Bergson. Segal a sua volta ringrazia per le indicazioni sulla storia delle metafore del cervello F. Tomasi, [cfr. Segal (2003), pp. 162-163]
- [Percival 1953] W. S. Percival, "The solution of passive electrical networks by mean of mathematical trees", in *Proceedings of IEE*, (1953), 100, pp. 143-150.
- [Percival 1955] W. S. Percival, "The graphs of active networks", in *Proceedings of IEE*, 102 (1955), pp. 270-78.
- [Perl 2001] E. R. Perl, "Edward R. Perl", in [Squire 2001], vol. 3, pp. 369-413.
- [Phillips e Wiener 1923] H. B. Phillips e N. Wiener, "Nets and the Dirichlet problem", in *Journal of mathematics and physics*, 2 (1923), pp. 105-124. [WCW1], pp. 333-352.
- [Piccinini 2003] Gualtiero Piccinini, *Computations and Computers in the Sciences of Mind and Brain*, Dissertation, Doctor of Philosophy, University of Pittsburgh, Faculty of Arts and Sciences, defended on June 20th, 2003.
- [Picone 1938] Mauro Picone, "Vedute unitarie sul calcolo delle soluzioni delle equazioni alle derivate parziali della Fisica-Matematica", in *Atti del 1° congresso di matematica applicata (Roma 4-6 giugno 1936)*, Bologna, Zanichelli, 1938.
- [Pitts 1942a] Walter Pitts, "Some observations on the simple neuron circuit", in *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 4, 121-129.
- [Pitts 1942b] Walter Pitts, "The linear theory of neuron networks: The static problem", in *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 4, 169-175.
- [Pitts 1943a] Walter Pitts, "The linear theory of neuron networks: The dynamic problem", in *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 23-31.
- [Pitts 1943b] Walter Pitts, "A general theory of learning and conditioning." *Psychometrika*, 8, 1-18, 131-140.
- [Poincaré 1908] Henri Poincaré, "L'avenir des mathématiques", in *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 19 (1908), pp. 930-939.
- [Polanyi 1952] Michael Polanyi, "The Hypothesis of Cybernetics", in *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 2 No. 8 (1952) pp. 312-315.
- [Polanyi 1958] Michael Polanyi, *Personal knowledge. Towards a post-critical philosophy*. Chicago, University of Chicago Press, 1958.
- [Popper 1950] Karl R. Popper, *Indeterminism in quantum physics and in classical physics. Part II*, British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 1, No. 3 (1950), pp. 173-195.
- [Porter 1965] Arthur Porter, "The Servo Panel. A unique contribution to control-systems engineering." *Electronics & Power* October 1965, pp. 330-333,

- [Pratt 1987] Vernon Pratt, *Thinking Machines. The Evolution of Artificial Intelligence*, Oxford, Basil Blackwell, 1987; tr. it.: Id., *Macchine pensanti. L'evoluzione dell'intelligenza artificiale*, Bologna, Il Mulino, 1990.
- [Price 1964] William J. Price, *Nuclear Radiation Detection*, New York, etc., McGraw Hill, 2. ed. 1964; Id., *Rivelazione della radiazione nucleare*, Roma, Bulzoni, 1972.
- [Price 2000] Alfred Price, *Battle of Britain Day : 15 September 1940* London : Greenhill Books ; Mechanicsburg, PA, Stackpole Books, 2000.
- [Pugliese 2010] Enrico Pugliese “Ricerca, Industria, Sviluppo”, in [Greco e Termini 2010], pp. 251-254.
- [Pursell 1979] Carroll Pursell, “Science Agencies in World War II: The OSRD and its Challengers”, in [Reingold 1979].
- [Ragazzini et al. 1947] John R. Ragazzini, Robert H. Randall e Frederick A. Russell, “Analysis of Problems in Dynamics by Electronic Circuits”, in *Proc. I.R.E.* Vol. 35, May (1947).
- [Rajchman 1980] J. Rajchman (1980), "Early Research on Computers at RCA," in [Metropolis et al. 1980], pp. 465-469.
- [Rajchman et al. 1942] J. A. Rajchman, G.A.Morton and A.W. Vance, “Report on Electronic Predictors for Anti-Aircraft Control”, in Aprile 1942, in [Randell 1982], pp. 345-348.
- [Ramage e Shipp, 2009] Magnus Ramage e Karen Shipp (cur.), *Systems Thinkers*, Dordrecht - Heidelberg - London - New York, Springer, 2009.
- [Randell 1972] Brian Randell, "On Alan Turing and the Origins of Digital Computers", in *Machine Intelligence 7* B. Meltzer and D. Michie (cur), Edinburgh, Edinburgh Univ. Press, 1972, pp. 3-20.
- [Randell 1982] Brian Randell (cur.), *The Origins of Digital Computers. Selected Papers*, 3. ed., Berlino – Heidelberg – New York, Springer Verlag, 1982.
- [Randell 1982b] Brian Randell, “From Analytical Engine to Electronic Digital Computer: The Contributions of Ludgate, Torres, and Bush”, in *Annals of the History of Computing*, Vol. 4, No 4, October 1982, pp. 327 – 341.
- [Randell 1985] Brian Randell, *Comments on [Wiener 85a], [Wiener 85b]*, in *CW4*, pp. 135-136; ripubblicato come Id., “Comments on Wiener’s Memorandum”, in *Annals of the History of Computing*, 9/2 (1987), pp. 193-194.
- [Rapoport e Landau 1951] Anatol Rapoport e H. G. Landau, “Mathematical Biology”, in *Science* 27 July 1951.
- [Rashevsky 1933] Nicholas Rashevsky, “Outline of a physico-mathematical theory of excitation and inhibition.” *Protoplasma* 20 (1933.), 42.
- [Rashevsky 1934] Nicholas Rashevsky, “Foundations of Mathematical Biophysics”, in *Philosophy of Science*, Vol. 1, No. 2 (1934), pp. 176-196.
- [Rashevsky 1936] Nicholas Rashevsky, “Mathematical biophysics and psychology.” *Psychometrika*, 1 (1936), pp. 1–26.
- [Rashevsky 1938] Nicholas Rashevsky, *Mathematical Biophysics. Physico-Mathematical Foundations of Biology*. Chicago, University of Chicago Press, 1938.
- [Rees 1987] Mina Rees, “Warren Weaver, 1894-1978. A Biographical Memoir”, in Washington d.c., National Academy of Sciences, 1987.
- [Reingold 1979] Nathan Reingold (cur.), *The Sciences in the American Context: New Perspectives*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1979.
- [Remaud 2004] Patrice Remaud, *Une histoire de la genèse de l'automatique en France, 1850-1950. De l'école de la régulation française au début du XX^e siècle à l'émergence de l'automatique en France après la seconde guerre mondiale*, Sous la direction de M. le Professeur André Guillaume et de M. le Professeur Jean-Claude Trigeassou, Thèse de Doctorat en Histoire des sciences et des techniques, Paris, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, 6 juillet 2004.
- [Report to the Services no. 59] “Report to the Services no. 59, division 7 (Fire Control), Statistical method of prediction in Fire Control”, in breve introduzione seguita da una lista di “Initial distribution” a 64 membri, poi dal *Wiener’s Final Report* e dalla lettera: *Wiener a Weaver*, 15 gennaio 1943. DTIC unclassified number AD800206, repertito on line presso DTIC.
- [Richardson 1991] George P. Richardson, *Feedback thought in social science and systems theory*, Philadelphia, University of Pennsylvania press, 1991.
- [Rockefeller Report 1946] The Rockefeller Foundation Annual Report 1946, New York, 1946.
- [Rockefeller Report 1947] The Rockefeller Foundation Annual Report 1947, New York, 1947.
- [Rodgers 1969] William, Rodgers, *Think. A biography of the Watsons and IBM*, New York, Stein and Day, 1969.
- [Rojas e Ulf 2000] Raúl Rojas e Ulf Hashagen (eds), *THE FIRST computers. History and architectures* edited by Raul Rojas, Ulf Hashagen. Cambridge, MIT Press, 2000.
- [Roosevelt 1940] Franklin Delano Roosevelt, “Order establishing the National Defense Research Committee”, in 27 giugno 1940. FDRPL, Box 2.
- [Roosevelt 1941] Franklin Delano Roosevelt, “Executive Order 8807 - Establishing the Office of Scientific Research and Development”, 28 giugno 1941. www.presidency.ucsb.edu.

- [Rosenblath 1962] Frank Rosenblath, *Principles of Neurodynamics Perceptions and the Theory of Brain Mechanism*, Washington, Spartan Books, 1962.
- [Rosenblueth 1950] Arturo Rosenblueth, *The Transmission of Nerve Impulses at Neuroeffector Junctions and Peripheral synapses*. Cambridge (Mass.) – New York, The MIT press – Wiley and Sons, 1950.
- [Rosenblueth 1970] Arturo Rosenblueth, *Mind and brain. A philosophy of science*, Mind and brain : A philosophy of science. Cambridge (Mass.), The MIT press, 1970.
- [Rosenblueth e Cannon 1942] Arturo Rosenblueth and Walter B. Cannon “Cortical Responses to Electric Stimulation”, in *American Journal of Physiology*, January 31, 1942 135:690-741.
- [Rosenblueth e Wiener 1945] Arturo Rosenblueth e Norbert Wiener, “The role of models in science”, in *Philosophy of Science*, Vol. 12, No. 4 (1945), pp. 316-321; [WCW4], pp. 445-451.
- [Rosenblueth e Wiener 1946] Arturo Rosenblueth e Norbert Wiener, “The mathematical formulation of the problem of conduction of impulses in a network of connected elements, specifically in cardiac muscle”, in *Arch. Inst. Cardiol. Mexicana*, 16 (1946), pp. 205-265. Ripubblicato in [WCW4], pp. 511-571.
- [Rosenblueth et al. 1942] A. Rosenblueth, D. D. Bond e W. B. Cannon, “The Control of Clonic Responses of the Cerebral Cortex”, in *American Journal of Physiology*, vol. 137 (1942), pp. 681-694.
- [Rosenblueth et al. 1943] Rosenblueth, A., Wiener N. e Bigelow, J., “Behavior, Purpose and Teleology”, in «Philosophy of Science», in 10 (1943), pp. 18-24. [WCW4], pp. 180-186].
- [Rossi P. 2000] Paolo Rossi (cur.), *Storia della Scienza Moderna e Contemporanea*, Milano, Tea, 2000.
- [Rossi P. A. 1978] Paolo Aldo Rossi (cur.), *Cibernetica e Teoria dell'Informazione*, Brescia, La Scuola, 1978.
- [Rotblat 2004] Joseph Rotblat, intervistato da Stefania Maurizi, capitolo “L'uomo che seppe: Sir Joseph Rotblat e il genio della bottiglia” di [Maurizi 2004], pp. 74-95.
- [Routh 1877] Edward John Routh, *A treatise on the stability of a given state of motion, particularly steady motion. Being the essay to which the Adams prize was adjudged in 1877*, in the University of Cambridge, London, Macmillan and co., 1877.
- [Rovelli 2011] Carlo Rovelli, *Che cos'è la scienza. La rivoluzione di Anassimandro*, Milano. Mondadori, 2011.
- [Rowe 1948] A. P. Rowe, *One Story of Radar*. London, Cambridge University, 1948, pp. 4-5.
- [Rowe e McCleary 1988] David E. Rowe e John McCleary (cur.), *The history of modern mathematics. Vol. II: Institutions and applications*. Proceeding of the Symposium on the History of Modern Mathematics, Vassar College, Poughkeepsie, New York, June 20-24, 1988, Boston [ecc.], Academic Press, 1989.
- [Rubin 1968] , M. D. Rubin, “History of technological feedback”, in [Milsum 1968], pp. 9-22, “Cap. 2”.
- [Sale 2003] Tony Sale, “Alan M. Turing at Bletchley Park in World War II”, in [Teuscher 2003], pp. 441-443.
- [Salvadori 1939] Mario G. Salvadori, “The activity of the Italian National Institute for the Application of Calculus”, in [Den Hartog e Peters 1939], pp. 260-264.
- [Sambursky 1956] S. Sambursky, *The physical world of the Greeks*, London, Routledge and Paul, 1956; tr. it.: Id., *Il mondo fisico dei greci*, Milano, Feltrinelli, 1967.
- [Schreyer 1990] Helmut T. Schreyer, “An Experimental Model of an Electronic Computer”, in *Annals of the History of Computing*, Vol. 12, Number 3, (1990), pp.189-197.
- [Schrödinger 1944] Erwin Schrödinger, *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell*,
- [Sebag-Montefiore 2000] Hugh Sebag-Montefiore, *Enigma. The Battle for the Code*, London, Weidenfeld & Nicolson, 2000.
- [Segal 1998] Jerome Segal, *Théorie de l'information. Sciences, techniques et société de la seconde guerre mondiale à l'aube du XXIe siècle*, Thèse de doctorat présentée devant l'Université Lumière Lyon 2, 1998.
- [Segal 2003] Jerome Segal, *Le Zéro et le Un. Histoire de la notion scientifique d'information au 20 a siècle*, Paris, Syllepse, 2003.
- [Seguin e Lavoisier 1789] Armand Seguin e Antoine Laurent Lavoisier, “Premier Mémoire sur la respiration des animaux”, in *Mémoires de l'Académie des sciences* (1789).
- [Serber 1943] Robert Serber, “The Los Alamos Primer”, Dispense ciclostilata relative ai seminari introduttivi tenuti da Serber nell'aprile 1943 (LATVAS). Inizialmente “Secret”.
- [Shannon 1937] Claude E. Shannon, *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*, Tesi per il Master of Science, “Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science from the Massachusetts Institute of Technology 1940” Advisor: Frank L. Hitchcock.; in calce alla firma dell'autore è riportata la data 10 agosto 1937 sebbene il frontespizio riporti i dati sopra indicati. Riproduzione fotostatica disponibile sul sito dell'MIT: <http://dspace.mit.edu>.
- [Shannon 1938] Claude E. Shannon, “A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits”, in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 57, No 12 (Dec. 1938), pp. 713–723.
- [Shannon 1940] Claude E. Shannon, *An Algebra for Theoretical Genetics*, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. From the Massachusetts Institute of Technology 1940, Department of Mathematics, April 15, 1940. <http://dspace.mit.edu>.
- [Shannon 1941] Claude E. Shannon, “Mathematical Theory of the Differential Analyzer”, in *Journal of Mathematics and Physics*, 20/4, (December 1941), pp. 337-354.

- [Shannon 1945] Claude E. Shannon, "A Mathematical Theory of Cryptography", in Memorandum MM 45-110-02, Sept. 1, 1945, Bell Laboratories, 114 pp. + 25 figs. Poi declassificato e pubblicato come [Shannon 1949].
- [Shannon 1948] Claude E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", in *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, (1948), No. 3, July: pp. 379–423; No 4, October: pp. 623–656.
- [Shannon 1949] Claude E. Shannon, "Communication Theory of Secrecy Systems", in *Bell System Technical Journal*, Vol. 28 (1949), pp. 656-715.
- [Shannon 1993] Claude E. Shannon, *Collected papers*. Edited by N.J.A. Sloane and Aaron D. Wyner, New York : IEEE Press, c1993.
- [Shannon e McCarthy 1956] C. E. Shannon e J. McCarthy, *Automata Studies*, Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1956.
- [Shannon e Weaver 1949] Claude E. Shannon e Warren Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1949, 1963². La pubblicazione mette insieme due articoli apparsi indipendentemente: Warren Weaver, *Recent contributions to the mathematical theory of communication* (pp. 3-28), che era apparso in forma condensata su *Scientific American* nel luglio 1949 e [Shannon 1948].
- [Shestakov 1938] V. I. Shestakov, *The Synthesis of Mixed Contact-Relay Networks of Class A*, Dissertation, Lomonosov State University works of Class P, "Isv. V. U.Z., Radiofiz., Vol. 3, No. 3, Mosca, 1938.
- [Shestakov 1941] V. I. Shestakov, "Algebra of Two Poles Schemata (Algebra of A-Schemata)", in: *Automatics and Telemechanics*, 1941, n. 2, p. 15–24 (in russo).
- [Siegel e Wiener 1953] A. Siegel e N. Wiener, *A new form for the statistical postulate of quantum mechanics*, «Physical Review», 9 (1953), pp. 1551-1560. [WCW3], pp. 492-501
- [Siegel e Wiener 1955] A. Siegel e N. Wiener, *The differential space theory of quantum systems*, in «Nuovo Cimento», (10) 2 (1955), pp. 982-1003, No. 4, Supplemento
- [Siegel e Wiener 1956] A. Siegel e N. Wiener, *The «Theory of measurement» in differential space quantum theory*, in «Physical Review», 101 (1956), pp. 429-432. [CW3], pp. 527-530.
- [Sloane e Wyner 1993] N.J.A. Sloane and Aaron D. Wyner, "Biography of Claude Elwood Shannon", in [Shannon 1993].
- [Smalheiser 2000] Neil R. Smalheiser, "Walter Pitts", in *Perspectives in Biology and Medicine*, Vol. 43, No 2 (2000), pp. 217-226.
- [Smith 1929] David Eugene Smith, *A Source Book of Mathematics*, a cura di D. E. Smith, New York - London, McGraw-Hill, 1929.
- [Smith 1989] Robert W. Smith, *The Space Telescope: A Study of NASA, Science, Technology, and Politics* (1989)
- [Snell 1997] J. Laurie Snell, "A conversation with Joe Doob", in *Statistical Science*, 12/4 (1997), pp. 301-311.
- [Somenzi 1965] Somenzi, Vittorio (cur.), *La filosofia degli automi*, Torino, Boringhieri, 1965.
- [Somenzi 1969] Somenzi, Vittorio (cur.), *La fisica della mente*, Torino, Boringhieri, 1969.
- [Somenzi 1978] Vittorio Somenzi, "Cibernetica", in *Enciclopedia Italiana*, Aggiornamenti, vol. IV, 1961-1978, Roma, Istituto Treccani, 1978, pp. 430-432.
- [Somenzi-Cordeschi 1994] Vittorio Somenzi e Roberto Cordeschi (cur.), *La filosofia degli automi. Origini dell'intelligenza artificiale*, a cura di, Torino, Boringhieri, 1994. Edizione riveduta e corretta di [Somenzi 1965], con l'aggiunta di nuovi scritti e l'omissione di altri.
- [Squire 2001] Larry R. Squire (cur.), *The History of Neuroscience in Autobiography*, San Diego, ecc., Academic Press, 2001.
- [Stankovic et al. 2001] Radomir S. Stankovic, Tsutomu Sasao e Jaakko T. Astola, "Publications in the First Twenty Years of Switching Theory and Logic Design", in agosto 2001, sul sito della Tampere University of Technology: <http://sp.cs.tut.fi>.
- [Stankovic et al. 2007] R.S. Stankovic, J. Astola e M.G. Karpovsky, "Some Historical Remarks on Switching Theory", in *Proceeding of International Workshop on Spectral Techniques*, 2007.
- [Stephan et al. 1965] Frederick F. Stephan, John W. Tukey, Frederick Mosteller, Alex M. Mood, Morris H. Hansen, Leslie E. Simon, W. J. Dixon, "Samuel S. Wilks." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 60, No. 312 (1965), pp. 939-966.
- [Stern 1980] Nancy Stern, "John von Neumann's Influence on Electronic Digital Computing, 1944-1946", in *Annals of the History of Computing*, Vol. 2, No. 4 (1980), pp. 349-362.
- [Stern 1981] Nancy Stern, *From ENIAC to UNIVAC. An appraisal of the Eckert-Mauchly computers*, Bedford, Ma, Digital Press, 1981.
- [Stern 1989] Nancy Stern, "Foreword" a [von Neumann 1946a], *Annals of the History of Computing*, vol. 10, No. 4 (1989), pp. 245-246.
- [Stewart 1948] Irvin Stewart, *Organizing Scientific Research for War. The Administrative History of the Office of Scientific Research and Development*, Boston, Little, Brown and Company, 1948.

- [Stibitz 1944a] George R. Stibitz, "Statistical Method for Certain Nonlinear Systems", in December 9, 1944, NARA, Record Group 227, Records of the OSRD, Div. 7, Office Files of H. L. Hazen. Citato in [Bennett 1994, p. 61, e nota 27]
- [Stibitz 1944b] George R. Stibitz, "Noise Spectrum for Certain Nonlinear Mechanisms", in December 11, 1944. NARA, Record Group 227, Records of the OSRD, Div. 7, Office Files of H. L. Hazen. Citato in [Bennett p. 61, e nota 27].
- [Stibitz 1945a] George R. Stibitz, "Relay Computers." Restricted, NDRC-RC AMP, Memo 171.1 R, February 1945, v. 70; un dettagliato riassunto in [MDL 1947a].
- [Stibitz 1945b] George R. Stibitz, "A talk on relay computers." NDRC-RC: AMP. Memo 171.1 M 1945.
- [Stibitz 1986] George R. Stibitz, "Curriculum Vitae", in aggiornato al 1986, reperibile sul sito <http://stibitz.denison.edu/info.html>.
- [Stibitz's Note on Predicting Networks] George R. Stibitz, "Note on Predicting Networks", in Febbraio 1942. Brani sono citati in Bennett (1994). La nota è accompagnata dal lungo documento: G. R. Stibitz, "Prediction Circuits a la Wiener", in 8 febbraio 1942, NAR, Record Group 227, Records of the OSRD, General Project Files, Project #6 MIT Reports.
- [Stibitz's Report on Visit] George R. Stibitz, "Report on Visit to Prof. Norbert Wiener", in 28 ottobre 1941, Record Group 227, OSRD, Division 7, Records of Chiefs and Members of Sections, 1940-46, George R. Stibitz, Section 7.1, Land-Based Fire Control Problems, "Predictions I," MIT, NDCrc-83, NA-LC. Brani citati Citato in Galison (1994).
- [Stodola 1893] A. B. Stodola, "Über die Regulierung von Turbinen", in *Schweitzer Bauzeitung*, 22 (1893), pp. 113-117; 121-122; 126-128; 134-135.
- [Stoney Turing 1959] Ethel Sara Stoney Turing, *Alan M. Turing*, Cambridge (Eng.), W. Heffer, 1959.
- [Strieby 1938] M. E. Strieby, "Coaxial Cable System for Television Transmission", in *Bell System Technical Journal*, 17, n.3 (1938), pp. 438-457.
- [Suits e Lafferty 1970] C. G. Suits e J. M. Lafferty, "Albert Wallace Hull, 1880-1966", in *A Biographical Memoir*, Washington, D.C., National Academy of Sciences, 1970.
- [Sullivan 1964] Harry Stack Sullivan, *The Fusion of Psychiatry and Social Science*, New York, Norton, 1964.
- [Summary Report for Demonstration] Julian Bigelow e Norbert Wiener, "Summary Report for Demonstration", in 10 giugno 1942, Record Group 227, OSRD, NDRC Contractors' Technical Reports, Division 7, MIT, NDCrc-83, National Archives, Library of Congress, Washington, D. C. Ampì brani sono citati in Galison (1994) e in Hellman (1981).
- [Summary Report of the Division 7 vol. I] Vannevar Bush, James Conant, e Harold Hazen, *Summary Technical Report of the Division 7, NDRC*. Vol. 1: *Gunfire Control*. Washington 1946. Il testo è suddiviso in due parti: Part I: *Gunfire Controll*, con la descrizione dei diversi progetti nell'arco dei 5 anni. Part II: R. B. Blackman, H. W. Bode, and C. E. Shannon, *Data Smoothing and Prediction in Fire-Control Systems* con la specifica dell'affiliazione ai BTL. Unclassified number AD200795, DTIC <http://www.dtic.mil/dtic/>. Esistono altri due volumi della serie: Vol. 2: *Optical range finders* e Vol. 3: *Airborne fire control systems*.
- [Takahashi s.d.] Shigeru Takahashi, "Japanese Computer Pioneers. Nakashima Akira 1908-1970", in *IPSJ Computer Museum*, <http://museum.ipsj.or.jp/en/pioneer/a-naka.html> (aggiornamento 23 gennaio 2011)
- [Taylor 1939] Geoffrey Ingram Taylor, "Some recent developments in the study of turbulence", in [Hartog 1939], pp. 294-310.
- [Teleological mechanisms] "Conference on Teleological Mechanisms" del 21 e 22 ottobre 1946, in *Annals of the New York Academy of Sciences*, 50 (1948), pp. 259-277.
- [Termini 2006] Settimo Termini (cur.), *Imagination and Rigor: essays on Eduardo R. Caianiello's Scientific Heritage*. Milano, Springer, 2006.
- [Termini 2006b] Settimo Termini, "Imagination and Rigor. Their interaction along the way to measuring fuzziness and doing other strange things", in [Termini 2006], pp. 157-173.
- [Termini 2006c] Settimo Termini, "Remarks on the development of Cybernetics." in *Scientiae Mathematicae Japonicae*, 64, No. 2 (2006), pp. 461-468.
- [Termini 2010] Settimo Termini, "Dialoghi notturni di Norbert Wiener con se medesimo", in [Greco e Termini 2010], pp. 333-349.
- [Teuscher 2003] Christof Teuscher (cur.), *Alan Turing. Life and legacy of a great thinker*, Springer, 2003.
- [Therrien 2002] Therrien, C.W., "The Lee-Wiener legacy. A history of the statistical theory of communication", in *Signal Processing Magazine IEEE*, 19-6, (2002), pp. 33-44.
- [Thompson et. al. 1957] George Raynor Thompson et. al., *The United States army in World War II: The Technical Services, The Signal Corps: The Test (December, 1941 to July 1943)*, Washington, D.C.: Office of the Chief of Military History, United States Army, 1957, 265-274.
- [Tizard 1957] R. H. Tizard, "Reviews. A cybernetic interpretation of economics", in *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 30, No. (1957), pp. 161-4.
- [Todd 1974] John Todd, "John von Neumann and the National Accounting Machine", in *SIAM Review*, Vol. 16, No. 4 (Oct., 1974), pp. 526-530.

- [Todd e Sadler 1947] John Todd e D. H. Sadler, “Admiralty Computing Service.” *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, Vol. 19, No 2 (1947), pp. 289-297.
- [Tolle 1905] M. Tolle, *Die Regulung der Kraftmaschinen*, Berlin, Springer, 1905.
- [Trappl 2010] Robert Trappl (cur.), *Cybernetics and Systems 2010*. Vienna, Austrian Society for Cybernetic Studies, 2010.
- [Tukey 1952] John W. Tukey, “Book review: The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications, by Norbert Wiener”, in *Journal of the American Statistical Association*, 258 (Jun., 1952), pp. 319-321.
- [Tukey 1985] John Tukey. Intervistato da William Aspray, assistito da Albert Tucker, 11 April 1984, Princeton University, Number 41 (PMC41). The Trustees of Princeton University, 1985.
- [Turing 1936] Alan M. Turing, “On Computable Numbers, with an Application to the *Entscheidungsproblem*” (1936). *Proceedings of the London Mathematical Society*. Vol. 42 No. 2: (1936–37), pp. 230–65.
- [Turing 1942] Alan M. Turing, “Turing’s Report on His Visit to NCR”, in Dicembre 1942, inizialmente classificato “Secret”, in (NARA), Record Group 38, Crane Library, File: CNSG 5750/441. Pubblicato a cura di Ralph Erskine, Philip Marks e Frode Weiemd nel 23 ottobre 2000, sul sito <http://cryptocellar.web.cern.ch/cryptocellar/USBombe>
- [Turing 1947] Alan M. Turing, “Lecture to the London Mathematical Society on 20 February 1947”, in [Turing 1986], pp. 106-124.
- [Turing 1950] Alan M. Turing, “Computing Machinery and Intelligence”, in *Mind*, 59 (1950), 433–460. Riprodotto in Turing (2004), pp. 441-464.
- [Turing 1986] Alan M. Turing, *Ace report of 1946 and other papers*, a cura di B. E. Carpenter and R. W. Doran, Cambridge Mass. [ecc.] : MIT Press, c1986.
- [Turing 2004] Alan M. Turing, *The Essential Turing. Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life: Plus The Secrets of Enigma*, A cura di B. Jack Copeland, Oxford, Oxford University Press, 2004.
- [Tustin 1947a] Arnold Tustin, “The nature of the operator's response in manual control, and its implications for controller design” *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIA: Automatic Regulators and Servo Mechanisms*, Vol. 94 , No. 2 (1947) pp. 190–206.
- [Tustin 1947b] A. Tustin, “A method of analysing the behaviour of linear systems in terms of time series”, in *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIA. Automatic Regulators and Servo Mechanisms*, Vol.: 94, No. 1 (1947), pp. 130-142.
- [Tustin 1950] Arnold Tustin, “Problems to be solved in the devepment of control systems”, in *Transactions - Society of Instrument Technology*, 2 (1950), pp. 19-27.
- [Tustin 1952] Arnold Tustin, “Direct Current Machines for Control Systems”, in The Macmillan Company, New York, 1952, pp. 45-46.
- [Tustin 1952] Arnold Tustin, “Direct Current Machines for Control Systems”, in The Macmillan Company, New York, 1952, pp. 45-46;
- [Tustin 1954] Arnold Tustin, *The mechanism of economic systems. An approach to the problem of economic stabilisation from the point of view of control-system engineering*, Londra, Heinemann, 1954.
- [Tustin 1957] Arnold Tustin, “The Consequences of Economic Stabilization”, in *Operational Research*, Vol. 8, No. 2 (1957), pp. 77-82.
- [UK patent GB 148582] British patent number: GB 148582; filed: 21 June 1918; complete accepted: 5 August 1920;
- [Ulam 1969] Stanislaw M. Ulam, *The role of the Los Alamos Laboratory work in the history of the modern computing machines*, 1969.
- [Ulam 1976] Stanislaw M. Ulam, *Adventures of a Mathematician*, New York, Charles Scribner’s Sons, 1976.
- [Ulam 1980] Stanislaw M. Ulam, “Von Neumann: the interaction of mathematics and computing”, in [Metropolis-Howlett-Rota 1980], pp. 93-99.
- [US patent nr. 1.113.149] Edwin H. Armstrong, “Wireless receiving system”, Filed october 29, 1913. www.freepatentsonline.com
- [US patent nr. 2.024.900] Norbert Wiener e Yuk-Wing Lee, “Electrical Network System.” Filed Sept. 2, 1931. www.freepatentsonline.com
- [US patent nr. 2.102.671] Harold S. Black, “Wave translation system.” Filed April 22nd, 1932. www.freepatentsonline.com
- [US patent nr. 2.124.599] Norbert Wiener e Yuk-Wing Lee, “Electrical Network System.” Filed July 7, 1936. www.freepatentsonline.com
- [US patent nr. 2.128.257] Norbert Wiener e Yuk-Wing Lee, “Electrical Network System.” Filed July 18, 1936. www.freepatentsonline.com
- [US patent nr. 2.401.779] Karl D. Swartzel (by BTL), “Summing Amplifier.” Filed on may 1, 1941. www.freepatentsonline.com

- [US patent nr. 2.403.852] Desch Joseph R., “Electronic Device and Control Means therefor”, in filed November 7, 1940. www.freepatentsonline.com
- [US Patent nr. 2.408.081] Clarence A. Lovell *et al.*, “Artillery Predictor.” Filed May 1, 1941. www.freepatentsonline.com
- [US Patent nr. 2.409.190] Gordon S. Brown and Jay W. Forrester, Sperry Gyroscope Company, “Remote Control System”, in Filed 20 september 1941. www.freepatentsonline.com
- [Verdict 1973] US District Court of Minnesota Fourth Division Civil Action, File No. 4-67 CIV. 138 Honeywell Inc., Plaintiff, vs. Sperry Rand Corporation and Illinois Scientific Developments, Inc., Defendants, Findings of Fact, Conclusions of Law and Order For Judgment. Verdict trial Honeywell vs Sperry Rand, October 1973. Testo reperito su www.ushistory.org/more/eniac/index.htm
- [Verveen 1971] A. A. Verveen, “In Search of Processes: The Early History of Cybernetics” in *Mathematical Biosciences* 11 (1971) [Trad. dall’olandese di un articolo apparso su *Natuurkundige Voordrachten* 47 (1969)], 5-29.
- [Vestine e Forbush 1953] Ernest H. Vestine e Scott E. Forbush, “Statistical Study of waves from blasts recorded in the United States”, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 58, No. 3 (1953), pp. 381-400.
- [VNCW1] John Von Neumann, *Collected Works*. 1: *Logic, theory of sets and quantum mechanics*, Oxford [...], Pergamon, 1961.
- [VNCW5] John Von Neumann, *Collected Works*. 5: *Design of computers, theory of automata and numerical analysis*, Oxford [...], Pergamon, 1963.
- [VNCW6] John Von Neumann, *Collected Works*. 6: *Theory of games, astrophysics, hydrodynamics and meteorology*, Oxford [...], Pergamon, 1963.
- [Volterra 1926a] Vito Volterra 1926, “Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi”, in *Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei* 2 (1926), pp. 31–113.
- [Volterra 1926b] Vito Volterra, 1926, "Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically," *Nature* 118 (1926), pp. 558–560.
- [Volterra 1931] Vito Volterra, *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie*, Paris, Gauthier-Villars, 1931.
- [von Förster 1968] Heinz von Förster (cur.) *Purpositive Systems*, New York, Spartan Books, 1968.
- [von Förster 1991] Heinz von Förster, “Cibernetica ed epistemologia: storia e prospettive”, in Bocchi e Ceruti (1991), pp. 112-140.
- [von Neumann 1922] John von Neumann, *Az altalanos nalmazelmélet axiomatikusságát vizsgálva*, tesi di dottorato, Università di Budapest, 1922.
- [von Neumann 1932a] John von Neumann, “Proof of the Quasi-ergodic Hypothesis”, in *Proceedings National Academy of Science*, 18 (1932), 70–82.
- [von Neumann 1932b] John von Neumann, “Physical Applications of the Ergodic Hypothesis”, in *Proceedings National Academy of Science*, 18 (1932), pp. 263–266.
- [von Neumann 1945] John von Neumann, “Use of Variational Methods in Hydrodynamics,” Memorandum di J. von Neumann a O. Veblen, 26 marzo 1945 [VNCW6, pp. 357-359].
- [von Neumann 1946a] John von Neumann, “The Principles of Large-Scale Computing Machines”, in Conferenza tenuta all’incontro del Mathematical Computing Advisory Panel of the Office of Research and Inventions of the Navy, Department in Washington, D.C., 15 May 1946; pubblicata per la prima volta in *Annals of the History of Computing*, Vol. 3, No. 3, July 1981; ed una seconda volta *ivi*, Vol. 10, No. 4 (1989), pp. 246-256, da dove si cita.
- [von Neumann 1949] John von Neumann, *Governed*, Recensione di *Cybernetics* [...], in «Phisics Today», maggio (1949), pp. 33-34.
- [von Neumann 1951] John von Neumann, *The General and Logical Theory of Automata*, in [Jeffress 1951], pp. 1-31]
- [von Neumann 1956] John von Neumann, *Probabilistic logics ad the synthesis of reliable organisms from unreliable components*, in Shannon e McCarthy (1956), Princeton 1956, pp. 43-98. Testo riveduto di una conferenza tenuta da von Neumann al California Institute of Technology nel gennaio 1952.
- [von Neumann 1958] John von Neumann, *The computer and the brain*, New Haven, Yale University press, 1958.
- [von Neumann 1961] John von Neumann, *Collected Works*, V, London, Pergamon Press, 1961.
- [von Neumann 1966] John von Neumann, *Theory of self-reproducing automata*, curato e completato da A. W. Burks, Urbana 1966.
- [von Neumann 2005] John von Neumann, *Selected letters*, Miklos Redei (editor); Providence : AMS ; London : London Mathematical Society, c2005.
- [von Neumann e Chandrasekhar 1943] John von Neumann e S. Chandrasekhar, “The statistics of the gravitational field arising from a random distribution of stars”, in *The Astrophysical Journal*, parte I, vol. 95 (1942), pp. 489-531; parte II, Vol. 97, No. 1 (1943), pp. 1-27.
- [von Neumann e Goldstine 1963] John von Neumann e Herman H. Goldstine, *On the principles of large scale computing machines*, in [VNCW5], pp. 1–32.

- [von Neumann e Morgenstern 1944] John Von Neumann e Oskar Morgenstern, *Theory of games and economic behavior*. Princeton, Princeton University Press, 1. ed. 1944, 1953.
- [von Neumann e Richtmyer 1950] John von Neumann e R. D. Richtmyer, "A method for the numerical calculation of hydrodynamic shocks", in *J. Appl. Phys.*, 21 (1950), p. 232.
- [von Neumann's Summary memorandum of the meeting] Lettera di Von Neumann a Howard Aiken, Leland E. Cunningham, W. E. Deming, H. H. Goldstine, W. S. McCulloch, Walter H. Pitts, E. H. Vestine, Norbert Wiener, and S. S. Wilks, 12 gennaio 1945 (VNLC) General Correspondence, Box 7, Wiener, illustrante i compiti dopo il convegno di Princeton del 6 e 7 gennaio 1945. Hellman (1981, pp. 231-2), citando la copia di questa lettera contenuta in WAMIT la chiama "Summary Memorandum of the meeting" tale indicazione che adottato nel testo non c'è però nelle fotocopie del testo originale da me ricevute dalla Library of Congress.
- [WCW] Wiener, Norbert, *Collected works. With commentaries*, a cura di Pesl R. Masani, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1976-1985. 4 vv.
- [WCW1] Wiener, Norbert, [WCW], v. 1. Mathematical philosophy and foundations; potential theory; Brownian movement, Wiener integrals, ergodic and chaos theories, turbulence and statistical mechanics, 1976.
- [WCW2] Wiener, Norbert, [WCW], v. 2. Generalized harmonic analysis and Tauberian theory, classical harmonic and complex analysis, 1979.
- [WCW3] Wiener, Norbert, [WCW], v. 3. The Hopf-Wiener integral equation; prediction and filtering; quantum mechanics and relativity; miscellaneous mathematical papers, 1981.
- [WCW4] Wiener, Norbert, [WCW], v. 4. Cybernetics, science, and society; ethics, aesthetics, and literary criticism; book reviews and obituaries, 1985.
- [Weaver 1946] Weaver, Warren, Foreword, a Vannevar Bush, James Conant e Warren Weaver, Summary Technical Report of the Applied Mathematics Panel, NDRC, vol. 3: Probability and Statistical Studies IN Warfare Analysis, pp. VI-VIII. DTIC. ADB809137. "Confidential" ora "Approved for public release, distribution"
- [Weaver 1949] Warren Weaver, "Translation", in 15 luglio 1949. In [Locke - Booth 1955], pp.15-23.
- [Weaver 1977] Warren Weaver. Intervistato da Hagemeyer, 7 febbraio 1977. File audio reperito sul sito www.weisses-rauschen.de.
- [Weinberg 1961] Alvin M. Weinberg, "Impact of Large-Scale Science on the United States: Big science is here to stay, but we have yet to make the hard financial and educational choices it imposes", in *Science*, 21 July 1961: pp. 161-164.
- [Weyl 1940] Hermann Weyl, *Algebraic Theory of Numbers*, Princeton University Press, 1940.
- [Wiener 1923] Norbert Wiener, "Differential Space", in *Journal of Mathematics and Physics*, 58 (1923), pp. 131-174, [WCW1], pp. 455-498.
- [Wiener 1926] Norbert Wiener, "The Operational Calculus", in *Mathematische Annalen*, 95 (1926).
- [Wiener 1929] Norbert Wiener, *Fourier analysis and asymptotic series*, appendice di Bush (1929), pp. 366-379.
- [Wiener 1930] Norbert Wiener, "Generalized Harmonic Analysis", in *Acta Mathematica*, 55 (1930), 117-258. [WCW2], pp. 183-324
- [Wiener 1931] Norbert Wiener, "The shattered nerves of Europe (Reports from Cambridge - 1931)", in *The Technology Review*, 34 (1931), p. 218, 220. [WCW4], p. 918-919.
- [Wiener 1932] Norbert Wiener, "Back to Leibniz! Physics reoccupies an abandoned position." in *The Technology Review*, 34 (1932), pp. 201-203, 222, 224 [WCW4], pp. 76-79]
- [Wiener 1932] Norbert Wiener, "Tauberian Theorems", in *Annals of Mathematics*, 33 (1932), 1-100. [WCW2], pp. 519-618.
- [Wiener 1936] Norbert Wiener, "The rôle of the observer", in *Philosophy of Science*, 3(1936), pp. 307-319. [WCW4], pp. 84-96].
- [Wiener 1938a] Norbert Wiener, "The decline of cookbook engineering", in «The Technology Review», in 41 (1938), p. 23. [WCW4], [38g], p. 896.
- [Wiener 1938b] Norbert Wiener, "The Homogeneous Chaos", in *American Journal of Mathematics*, 60 (1938). [WCW1], pp. 572-611.
- [Wiener 1939a] Norbert Wiener, "The use of statistical theory in the study of turbulence" in [Den Hartog e Peters 1939], pp. 356-358; ripubblicato in [CW1], pp. 641-650.
- [Wiener 1947] Norbert Wiener, "A scientist rebels", in *Atlantic Monthly*, 179 (1947), p. 46. [WCW4], p. 748.
- [Wiener 1948] Norbert Wiener, *Cybernetics. Or control and communication in the animal and the machine*, Paris, Hermann & Cie [...], 1948; Cambridge, Mass., MIT Press, 1948. Seguiremo l'edizione inglese del 1961 [Wiener 1961], che per i primi 8 capitoli è identica a meno di minime correzioni di refusi.
- [Wiener 1948a] Norbert Wiener, *Time, communication, and the nervous system*, in [Teleological Mechanisms], pp. 197-220. [WCW4], pp. 220-243.
- [Wiener 1948d] Norbert Wiener, "A rebellious scientist after two years", in *Bulletin of Atomic Scientists*, 4 (1948), p. 338. [WCW4], pp. 749-750.

- [Wiener 1949] Norbert Wiener, *The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications*, New York and London, Wiley & Sons, 1949; Cambridge, Mass., MIT Press, 1949. Con la dicitura «First published during the war as a classified report of Section D2, National Defense Research Committee».
- [Wiener 1949b] Norbert Wiener, *Godfrey Harold Hardy (1877-1947)*, in «Bulletin of the American Mathematical Society», 55 (1949), pp. 72-7. [WCW4], pp. 1033-8.
- [Wiener 1949c] Norbert Wiener, “A new concept of communication engineering”, in *Electronics*, 22 (1949), pp. 74-77. [WCW4], pp. 197-199.
- [Wiener 1949d] Recensione di: P. Frank, *Modern Science and its Philosophy*, New York, Book Review, 14 Agosto, 1949, 7, p. 3. [WCW4], pp. 996-7.
- [Wiener 1950] Norbert Wiener, *The Human Use of Human Beings*, 1. ed., Boston, Houghton Mifflin Company, e Londra, Eyre and Spottiswoode, 1950; tr. it.: Id.: *Introduzione alla Cibernetica*, trad. di Dario Persiani, pref. di Gino G. Sacerdote, Torino, Ed. Scientifiche Einaudi, 1953; 2^a tr. it.: Id., *Introduzione alla Cibernetica*, traduzione di Dario Persiani, introduzione di Francesco Ciafaloni, Torino, Boringhieri, 1966. Da entrambe le edizioni italiane è omissa il cap. 12: “Voices of Rigidity”, in pp. 214-229, che è invece stato tradotto nell'edizione francese *Cybernetics et société*, Paris, Ed. des Deux-Rives, 1952, pp. 265-283.
- [Wiener 1953] Norbert Wiener, *Ex-prodigy. My childhood and youth*, New York, Simon and Schuster, 1953; segue l'ed. *Idem*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 1964.
- [Wiener 1956] Norbert Wiener, *I am a mathematician. The later life of a prodigy; an autobiographical account of the mature years and career of childhood in Ex-prodigy*, Garden City, New York, Doubleday, 1956; segue l'ed. *Idem*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 1964.
- [Wiener 1958] Norbert Wiener, *My connection with cybernetics. Its origin and its future*, in «Cybernetica», (1958) pp. 1-14. [WCW4], pp. 107-120.
- [Wiener 1958b] Norbert Wiener, *Nonlinear problems in random theory*, New York and London, Wiley & Sons, 1958; Cambridge (Mass.), The MIT Press, 1958 e New York, Wiley, 1958, VII.
- [Wiener 1961] Norbert Wiener, *Cybernetics. Or control and communication in the animal and the machine*, 2 ed. accresciuta, New York, MIT Press; New York and London, Wiley & Sons, 1961 (Rispetto alla prima edizione contiene l'aggiunta di due capitoli: 9. «On learning and Self-Reproducing machines»; 10. «Brain Waves and Self-Organizing Systems»).
- [Wiener 1961b] Norbert Wiener, “Science and Society”, in *Voprosy Filosofii*, 7 (1961). In [WCW4], pp. 773-776.
- [Wiener 1965a] Norbert Wiener, *L'homme et la machine*, in [CISC 1965], pp. 99-132. [CW4], pp. 824 ss.
- [Wiener 1985a] Norbert Wiener, *Letter covering the memorandum on the scope [...] of a suggested computing machine*, Lettera di N. Wiener a Vannevar Bush, 21 settembre 1940, pubblicata in [WCW4] pp. 122-124.
- [Wiener 1985b] Norbert Wiener, *Memorandum on mechanical solution of partial differential equations*, pubblicata per la prima volta in [WCW4], pp. 125-134.
- [Wiener 1985c] Norbert Wiener, “A Mathematical Study of Clonus” parte II della ricerca in forma manoscritta N. Wiener, A. Rosenblueth, W. Pitts e J. Garcia Ramos, *Muscular clonus. Cybernetics and physiology*, pubblicato per la prima volta in WCW4, pp. 466-510, pp. 488-510.
- [Wiener 1991] Norbert Wiener, “Ergodic Theory” in [Klein 1991], pp. 320-330.
- [Wiener 1993] Norbert Wiener, *Invention. The Care and Feeding of Ideas*, Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1993, 1994². Opera postuma. L'ultima stesura del manoscritto risale al 1954, mi sembra perciò utile indicare quest'opera mediante questo anno; tr. it.: Id., *L'invenzione. Come nascono e si sviluppano le idee. L'invenzione. Come nascono e si sviluppano le idee*, trad. di S. Frediani, introduzione di Steve J. Heims, Torino, Bollati-Boringhieri, 1994.
- [Wiener a Weaver, 15 gennaio 1943] Rapporto di 5 pagine inviato da Wiener a Weaver, 15 gennaio 1943, accluso in [Report to the Services no. 59] AD800206, repertito on line presso DTIC.
- [Wiener e Pach 1983] Norbert Wiener e Leo Pach, “From the Archives”, in *Science, Technology, & Human Values*, Vol. 8, No. 3 (1983), pp. 36-8.
- [Wiener's Final Report] Norbert Wiener, “Final report on Section D2, Project # 6”, Documento di 8 pagine, già “Confidential”, in a firma di Wiener sottoposto a Warren Weaver, 1° dicembre 1942. Accluso a [Report to the Services no. 59] AD800206, repertito on line presso DTIC.
- [Wiener's Principles governing apparatus] Norbert Wiener, “Principles governing the construction of prediction and compensating apparatus”, in Allegato a Proposal to Section D2. Record Group 227, OSRD, Division 7, General Project Files, 1940-46. Ampii stralci sono stati citati da Masani e Phillips (1985), da Galison (1994).
- [Wiener's Response of a non-linear device] Norbert Wiener, Response of a non-linear device to noise (8 p.). Radiation Laboratory, MIT, # 129 Report V-165. April 6, 1942. DTIC unclassified nr. ADA800212.
- [Wiener's Yellow peril] Norbert Wiener, “The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications.” Rapporto NDRC n. 370, del 1° febbraio 1942, MIT D.I.C. Contract 6037, Feb.1, 1942. Ne è conservata copia presso i WAMIT, box 11, folder 561A. Rapporto pubblicato per la diffusione generale come [Wiener 1949]. Un censore, Tukey (1952, p. 319), ci assicura che a parte le

- appendici aggiunte «the volume under review consists of 123 pages devoted to a practically *verbatim* version of Wiener's original report».
- [Wiesner 1979] Jerome B. Wiesner, *Vannevar Bush*, in *National Academy of Sciences, Biographical Memoirs*, Washington, National Academy of Sciences, 1979, v. 50, pp. 88-117.
- [Wildes 1971] Karl L. Wildes, *The Digital Computer - Whirlwind*, 114 pagine. Parte di un manoscritto non pubblicato dal titolo "Electrical engineering at the Massachusetts Institute of Technology", in basato su documenti originali. La migliore fonte oggi disponibile sull'MIT Rapid Arithmetical Machine avviato da Vannevar Bush e sulla sua prosecuzione come Rockefeller Electronic Computer Project. In parte confluito in [Wildes e Lindgren 1985].
- [Wildes e Lindgren 1985] Karl L. Wildes - Nilo A. Lindgren *A century of electrical engineering and computer science at MIT, 1882-1982*, Cambridge (Massachusetts) and London (England), The MIT Press, 1985.
- [Williams 1985] Michael R. Williams, *A history of computing technology*, 1985; *Dall'abaco al calcolatore elettronico*, Trento, Franco Muzzio, 1989.
- [Williams 1989] Michael R. Williams, "Introduction" a [von Neumann 1946a], *Annals of the History of Computing*, Vol. 10, No. 4 (1989), pp. 243-245.
- [Williams e Nastasi 2007] Kim Williams e Pietro Nastasi "Mario Salvadori and Mauro Picone: From Student and Teacher to Professional Fellowship", in *Nexus Networks Journal*, Vol. 9, No. 2, (2007) pp. 165-183.
- [Winterbotham 1974] F. W. Winterbotham, *The Ultra Secret*. New York, Dell, 1974.
- [Wisdom 1951] J. O. Wisdom, "The Hypothesis of Cybernetics," in *British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 2, No. 5 (May, 1951), pp. 1-24.
- [Woodger 1937] J. H. Woodger, *The Axiomatic Method in Biology*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1937.
- [Wynn-Williams 1931] C. E. Wynn-Williams, "The Use of Thyratrons for High Speed Automatic Counting of Physical Phenomena" *The Proceedings of the Physical Society*, vol. 132 A (1931), 295-310.
- [Wynn-Williams 1932] C. E. Wynn-Williams, "Thyratron 'Scale of Two' Automatic Counter", in *The Proceedings of the Physical Society*. A 136 (1932), 312-324.
- [Wynn-Williams 1934] C. E. Wynn-Williams, "A relay memory for a thyatron counter", in *The Proceedings of the Physical Society*, Vol. 46, part 3, no. 254, May 1, 1934, pp. 303-311.
- [Wynn-Williams e Ward 1931] C. E. Wynn-Williams e F. A. B. Ward, "Valve Methods of Recording Single Alpha-Particles in the Presence of Powerful Ionising Radiations", in *The Proceedings of the Physical Society*, A 131 (1931), 391-409.
- [Year Book CIW 1946] Carnegie Institution of Washington Year Book, No. 46, July 1, 1946—June 30, 1947.
- [Yockey et al. 1958], Hubert P. Yockey, Robert L. Platzamn e Henry Quastler, *Symposium on Information Theory in Biology*, Gatlinburg, Tennessee, October 29-31, 1956, New York, etc., Pergamon Press, 1958.
- [Young 1950] David M., Jr. Young, *Iterative Methods for Solving Partial Difference Equations of Elliptic Type*, Department of Mathematics, Harvard University, 1950.
- [Young 1987] David M. Young, "A historical review of iterative methods", in *HSNC '87. Proceedings of the ACM conference on History of scientific and numeric computation*, Ed. GE Crane, New York, ACM Press, 1987, pp. 117-124.
- [Zachary 1997] G. Pascal Zachary, *Endless Frontier: Vannevar Bush, Engineer of the American Century*, New York, The Free Press, 1997.
- [Zangwill 1980] O. L. Zangwill, "Kenneth Craik: the man and his work", in *British Journal of Psychology*, 71 (1980)
- [Zellini 1996] Paolo Zellini, "Il calcolo e la scoperta della complessità", in SISSA, *Caos e Complessità*, Napoli, Cuen, 1996, pp. 63-108.
- [Zemanek 1991] Heinz Zemanek, "Geschichte der Schaltalgebra", in [Storia dell'algebra a relè], in M. Broy, *Informatik und Mathematik*, Berlino, Springer, 1991, pp. 43-72.